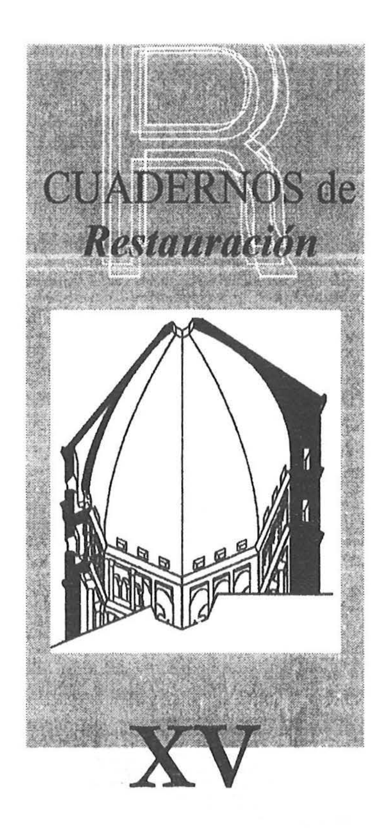


XV

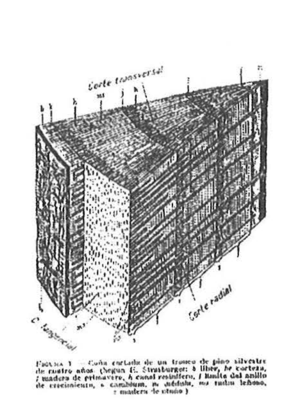
LA MADERA I

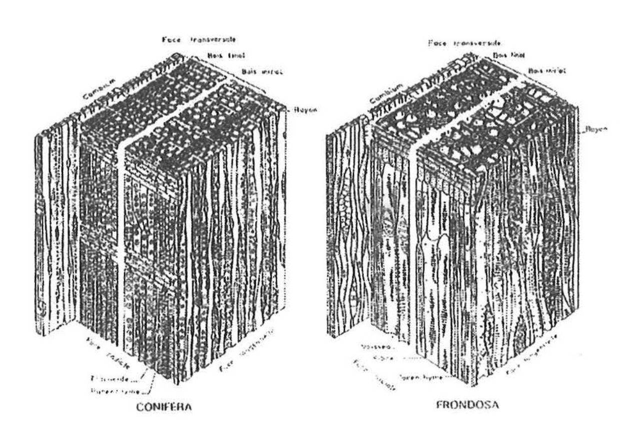
AGENTES DESTRUCTORES Y TRATAMIENTOS

ALEJANDRO LÓPEZ DE ROMA

LA DATACIÓN DENDROCRONOLÓGICA Y DEL RADIOCARBONO

EDUARDO RODRÍGUEZ TROBAJO





CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID



XV

LA MADERA I

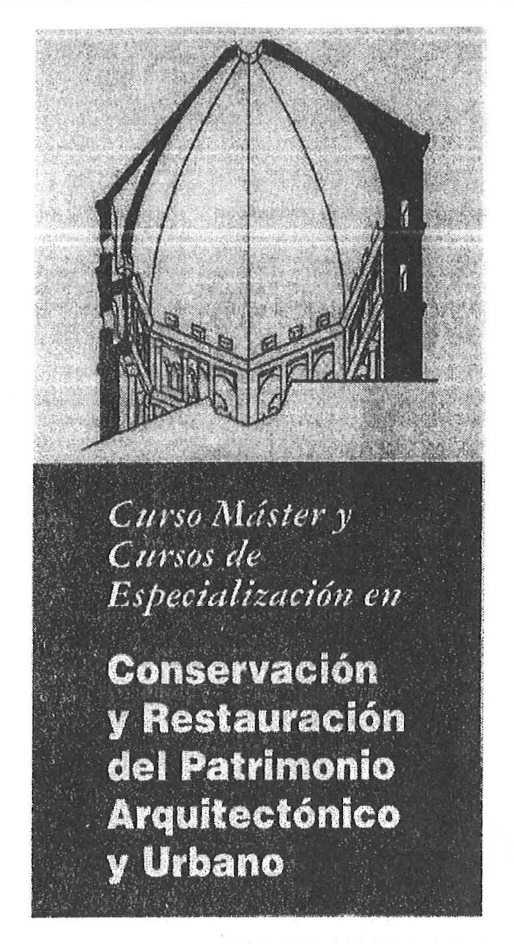
AGENTES DESTRUCTORES Y TRATAMIENTOS

ALEJANDRO LÓPEZ DE ROMA

LA DATACIÓN DENDROCRONOLÓGICA Y DEL RADIOCARBONO

EDUARDO RODRÍGUEZ TROBAJO

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID



DIRECCIÓN: Ricardo Aroca Hernández-Ros
D. Pedro Navascués Palacio
D. José Miguel Ávila Jalvo

COORDINADORA: Dña. Angelique Trachana



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

La madera I

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Composición y maquetación: Dionisio Ramón Martínez Alonso,
Carlos Enrique Beltrán,
Daniel Álvarez Morcillo
Coordinación editorial: Angelique Trachana
CUADERNO 93.01
ISBN: 84-95365-69-3 (obra completa)
ISBN: 84-95365-70-7 (la madera 1ª parte)
Depósito Legal: M-49887-2000

LA MADERA 1ª PARTE

LA MADERA, AGENTES DESTRUCTORES Y TRATAMIENTOS 05

LA MADERA: Estructura, composición química y causas de deterioro 05

1. La madera 07
1.1. Estructura macroscópica 07
1.2 Estructura microscópica 07
1.2.1. Características anatómicas de las coníferas 07
1.2.2. Características anatómicas de las frondosas 07
1.2.3. Punteadoras de paso 08
1.3. Composición química y organización de la pared celular 09
1.3.1. Composición química de la pared celular 09
1.3.1.1. Celulosa 09
1.3.1.2. Hemicelulosas 09
1.3.1.3 Lignina 09
1.3.2. Organización de la pared celular 09
1.3.2.1. Fibrillas elementales y microfibrillas 09
1.3.2.2. Constitución de la pared celular 10
1.3.3. Consideraciones sobre el comportamiento de los constituyentes de la pared celular 10
1.4. Relaciones agua-madera 10
1.4.1. Humedad de equilibrio en la madera 11
1.4.2. Etapas de la sorción 11
1.4.3. Hinchazón y merma 12
1.4.4. Secado de la madera 13

2. Agentes destructures 14
2.1. Agentes destructures bióticos 14
2.1.1. Hongos 14
2.1.2. Insectos 15
2.1.2.1. Insectos de signo larvario 15
2.1.2.2. Insectos sociales 15
2.2. Agentes destructores abióticos 18
2.2.1. Agentes atmosféricos 18
2.2.2. Agentes mecánicos 18
2.2.3. Agentes químicos 18
2.2.4. Sorción del agua 19
2.2.5. Fuego 19

3. Duración natural 20

4. Protectores 20

5. Sistemas de tratamiento 22
5.1. Tratamientos preventivos 22
5.2. Tratamientos curativos de la madera puesta en obra 23

I. **LA DATACIÓN DENDROCRONOLÓGICA** 25

1.1. Fundamentos del método 25
1.2. El procedimiento de datación 25
1.3. Las condiciones de aplicación 26
1.4. Algunos estudios realizados en España 28
1.5. Datación Carbono-14 y dendrocronología 29

II. LA DATACIÓN DEL RADIOCARBONO 31

2.1. Introducción 31
2.2. Principios generales 31
2.3. La aplicación del método 32
2.3.1. Condicionamientos inherentes al método 32
2.3.2. Condicionamientos incidentales 34
2.4 El resultado de la radiodatación 34
2.5. Un método combinado de datación 34

III. REFERENCIAS BÁSICAS 35

LA MADERA, AGENTES DESTRUCTORES Y TRATAMIENTOS

Dr. Alejandro López de Roma

LA MADERA: Estructura, composición química y causas de deterioro.

La madera presenta, como todos los demás materiales, ciertas limitaciones, entre las que destaca la relativa facilidad con que se altera en determinados medios, lo que ha originado que con frecuencia se la considere como poco durable. Esta opinión, por otro lado muy extendida, sólo es verdad en parte, pues prácticamente insensible al oxígeno del aire que oxida los metales y al tiempo que modifica los materiales plásticos, puede considerarse, en condiciones ordinarias de empleo, como casi inalterable por los agentes climáticos y físicos del medio ambiente (no se olvide la fotodegradación, con incidencia fundamentalmente superficial y la estabilidad dimensional), siendo sólo modificada, e incluso destruida, por el ataque de algunos organismos vivos que pertenecen en su mayor parte a los grandes grupos de los hongos y de los insectos. A estos hechos, hay que añadir que la resistencia de la madera al ataque de los organismos xilófagos varía en gran medida con la especie forestal a la que pertenece, los factores de crecimiento, la edad, las condiciones de uso y fundamentalmente según proceda de la parte interna del trono (duramen) más oscuro, impermeable y resistente, o de la zona clara que le rodea exteriormente (albura), más porosa y fácil de descomponer. (figura 1)



FIGURA 1: Degradación de una estructura de madera.

Las excelentes propiedades físico-mecánicas de la madera, junto a ser una materia prima de fácil acceso que puede elaborarse sin necesitar utillaje complicado, son algunas de las razones que justifican su empleo ininterrumpido por el hombre, y que éste, desde tiempos remotos, haya aprendido no sólo a conocer las especies más resistentes al ataque de los agentes destructores, sino también a idear métodos de lucha contra los mismos en función de los conocimientos que poseía en cada momento.
Ya en el Génesis (Capítulo VI, ver 14) se dice que Dios ordenó a Noé: "Fabrícate un arca de madera de ciprés, haz en el arca diversos compartimentos y embréala por dentro y por fuera", introduciendo así dos conceptos fundamentales en la protección de la madera, el empleo de una especie de buena duración natural y el de su tratamiento con un protector. Posteriormente, en la literatura griega y romana, son múltiples las referencias a la utilización de aceites y alquitranes, como las realizadas por Heródoto, Diodoro de Sicilia y Plinio el Viejo sobre el empleo por los antiguos egipcios de productos bituminosos y resina de cedro en la conservación de los sarcófagos y manuscritos valiosos. Otro procedimiento, para proteger la madera, al que hace referencia Julio César en "La Guerra de las Galias", si bien en realidad data de tiempos prehistóricos, es el "chamuscado", siendo curioso observar como sigue aplicándose esta primitiva técnica en países desarrollados. En la Edad Media es frecuente el empleo de petróleo y brea, así como de sales de mercurio y de arsénico. Estas últimas son utilizadas posteriormente por Leonardo da Vinci para proteger sus tallas contra el ataque de los insectos xilófagos.

No obstante, puede decirse que hasta el siglo XIX no aparece una verdadera protección científica de la madera, entendiendo como tal, aquella que se ocupa de transformarla, mediante un tratamiento, en una materia inatacable por los agentes destructores, sin que por ello se perjudiquen sus características físico-mecánicas. Este hecho coincide con el descubrimiento por Pasteur de la inexistencia de la generación espontánea, lo que permitió conocer las causas de los daños de forma racional y científica, y el desarrollo de la técnica en general y, más en concreto, con la aparición del ferrocarril y el telégrafo que trajeron consigo una amplia demanda de traviesas y postes. A partir de ese momento se suceden sin pausa nuevas patentes, tanto de protectores como de sistemas para su aplicación, en un afán de superación ininterrumpido.

En la actualidad, el aumento constante del consumo de madera, que ha hecho de ella un material escaso, la necesidad de introducir en el mercado especies que por su pequeña duración natural prácticamente no se utilizaban hasta fechas recientes, junto con el aumento cada vez mayor de los costes de reposición, el desarrollo del control obligatorio de la calidad, la demanda de productos que respondan a especificaciones concretas y la preocupación e interés crecientes por conservar estructuras y construcciones de madera testimonios de pasadas civilizaciones, sometidas a veces a penosas destrucciones, ha motivado que todos los países con cierto nivel de desarrollo intenten dar una respuestas adecuada a la amplia gama de temas que presenta su correcta protección.
El problema que presenta la protección de una estructura nueva de madera, si se quiere resolver de

forma adecuada, debe plantearse en términos claros y de manera racional, lo que implica un conocimiento completo del material que se desea proteger, de los posibles agentes destructores, de la forma en que las diferentes especies de madera reaccionan ante ellos (duración natural) de los riesgos que entraña cada tipo de utilización, de los posibles protectores a emplear, de las técnicas de tratamiento más adecuadas, etc.
Igualmente, cuando se trata de paralizar la acción de los agentes destructores, es necesario determinar el tratamiento curativo a aplicar, previo estudio de la naturaleza e intensidad de los daños, tipo y dimensiones de los diferentes elementos de madera, características de la construcción, si se trata de un edificio, etc.
Por todo lo anteriormente expuesto, plantear y resolver de forma adecuada un problema de protección de maderas exige:
Conocimiento de la misma, es decir, del material que se quiere conservar y tratar, tanto en lo que respecta a su composición química y estructura microscópica y submicroscópica, como a sus propiedades físico-químicas.
Conocimiento de los posibles agentes destructores, según el uso que se vaya a hacer de la madera, así como, si ya está instalada, su estado de conservación en el momento de iniciar los trabajos de restauración.
Elección de los protectores y de las técnicas de tratamiento más adecuadas, en función de la especie de madera a conservar, su estado de conservación, la naturaleza e intensidad de los daños, dimensiones de los diferentes elementos de la madera, uso que se va a seguir haciendo de la misma, etc.

1. La madera

La madera no es un material homogéneo de estructura uniforme, sino un conjunto de células muy dispares que en el vegetal vivo cumplen, según sus características específicas, las funciones de: conducción de la savia, transformación y almacenamiento de sustancias y sostén del vegetal.
La heterogeneidad y anisotropía de la madera son producto de la variabilidad de las células que la constituyen, siendo de destacar que sus características anatómicas, físico-mecánicas e incluso tecnológicas varían según las tres direcciones de referencia que normalmente se consideran: longitudinal, radial y tangencial. A estas tres direcciones se asocian las tres secciones clásicas: la transversal o perpendicular al eje del árbol; la radial, que corresponde a un plano que pasa por el citado eje y, la tangencial, perpendicular a la anterior y tangente a los anillos de crecimiento.

1.1. Estructura macroscópica

Al examinar la sección producida por un corte transversal en el tronco de un árbol, se observa, del interior al exterior, las siguientes capas:
- Médula que discurre por el interior del tronco y tiene normalmente 1 ó 2 mm., aunque en algunas especies puede ser más ancha

Estructura leñosa que rellena la mayor parte del tronco y en la que pueden observarse los anillos anuales de crecimiento. A partir de determinada edad, prácticamente constante para cada especie pero variable de unas a otras, sólo los anillos periféricos más jóvenes juegan un papel activo en la vida del árbol, posibilitando el transporte de savia, almacenando sustancias nutritivas y constituyendo la zona exterior del tronco que se conoce con él nombra de *albura*. Por el contrario, los anillos más antiguos, cuyo conjunto se denomina *duramen*, dejan de cumplir esta misión, quedando su labor reducida exclusivamente al sostenimiento mecánico, y ello, debido a que sufren una serie de transformaciones no sólo estructurales, como pueden ser las obstrucciones de los vasos por membranas secundarias, sino también a otras de tipo químico, entre las que destacan la aparición en sus tejidos de cantidades importantes de taninos y resinas que les proporcionan una coloración más oscura, lo que permite distinguirlos fácilmente de la albura.

Como se observa, en toda la zona ocupada por la albura y el duramen, hacen acto de presencia los anillos de crecimiento, los cuales corresponden, como ya hemos indicado, a los crecimientos anuales en espesor del tronco. Su apreciación es más marcada en las coníferas que en las frondosas.
Otros elementos anatómicos, visibles en ocasiones a simple vista, son los radios leñosos._En la sección transversal toman la forma de una línea de anchura variable que corre en dirección más o menos perpendicular a los anillos de crecimiento, dirigiéndose desde la corteza hacia la médula. En las coníferas suele ser difícil su apreciación a simple vista.
Cambium, capa de células vivas generadora del crecimiento en espesor del árbol. Esta capa produce corteza hacia el exterior y madera hacia el interior del tronco. La producción de madera y corteza ocurre sólo cuando el cambium está activo, lo que tiene lugar en nuestras regiones templadas en primavera y verano.
Corteza interna o liber. Realiza funciones conductoras de la savia elaborada desde las hojas a aquellas zonas activas donde ésta es necesaria o debe ser almacenada.
Corteza externa o corteza propiamente dicha. Esta capa de células muertas protege a la madera de los cambios extremos de temperatura, sequía y agresiones mecánicas.
-

1.2. Estructura microscópica

Las distintas especies de madera presentan diferencias profundas, que se hacen perceptibles al observarlas con un aumento adecuado. En razón de su estructura anatómica, todas las maderas pueden englobarse en uno de los siguientes grandes grupos: coníferas y frondosas.

1.2.1. Características anatómicas de las coníferas

Las coníferas presentan unas células cerradas, alargadas y acabadas en punta que ejercen al mismo tiempo funciones conductoras, por lo que se comunican entre sí por numerosas perforaciones (punteaduras

areoladas) que permiten el paso de los líquidos, y de sostén, ya que aseguran la rigidez del tronco. Estas células representan en las coníferas aproximadamente el 90% del volumen total de la madera y pueden tener una longitud de 10 mm., aunque normalmente su longitud varía entre 2,5 y 5 mm. Se orientan según el eje del árbol, de forma que en una sección transversal se asemejan a las celdillas de un panal.

Las traqueidas formadas en la primavera presentan paredes más delgadas y lúmenes más anchos, como corresponde a la necesidad de disponer de un mayor flujo de savia. Por el contrario, las traqueidas de verano presentan paredes más anchas y lúmenes más estrechos, por lo que presentan una mayor resistencia que las de primavera.
parte de las traqueidas, la madera de coníferas presenta elementos de almacenamiento, las células de parénquima, que tienen forma rectangular, paredes delgadas y numerosas punteaduras, pudiéndose disponer paralelamente al eje del árbol (parénquima longitudinal) o transversalmente al mismo (parénquima radial), siendo más frecuente este último en las coníferas.

Estas células de parénquima difieren de las traqueidas en que permanecen vivas durante varios años después de su formación. Esta característica, es debida a que los elementos que acumulan no son directamente utilizables por el árbol, requiriendo una transformación previa, lo que sólo puede ser efectuado por una célula viva. Cuando su utilidad como células de almacenamiento finaliza, la célula muere.

En los radios leñosos aparecen siempre las células de parénquima radial antes comentadas y, en ocasiones, traqueidas radiales, las cuales sirven como elementos positivos de identificación por sus especiales características anatómicas.
También es corriente la aparición de canales resiníferos, los cuales son orificios rodeados por células epiteliales. Estos canales resiniferos son más frecuentes en el tejido vertical, pero tampoco son infrecuentes en el horizontal. Estos canales resiníferos pueden facilitar también el flujo de fluidos por el interior de la madera.

1.2.2. Características anatómicas de las frondosas

Las frondosas presentan tres grandes tipos de tejido: el conductor, formado por vasos; el de sostén, formado por fibras; y el de reserva, formado por células de parénquima.

Un vaso, es realmente, una agrupación longitudinal de elementos vasales que se extiende ininterrumpidamente a lo largo de grandes longitudes por el tronco del árbol. Cuando estas células o elementos vasales se forman, presentan, al igual que otras células, tabiques transversales, pero pronto estos se rompen o son absorbidos, de forma que los vasos constituyen tubos continuos a semejanza de tuberias. Cuando los tabiques transversales no desaparecen por completo, dan lugar a diversos tipos de perforaciones de paso, que tienen un gran interés desde el punto de vista de la identificación de la madera.

Los vasos pueden ser de mayor o menor diámetro, más o menos numerosos y de diversa repartición o agrupamiento según las distintas especies. Así el roble, el fresno y el olmo, tienen los vasos de la madera de primavera muy anchos y visibles a simple vista, presentando además un paso brusco entre el tamaño de los vasos formados en primavera y los formados en verano, diciéndose que estas especies tienen *anillo poroso.* Otras especies, como el chopo y el haya, presentan vasos con tamaño uniforme a lo largo de todo el anillo o, a todo lo más, con un decrecimiento gradual de tamaño sin cambios bruscos, a estas maderas se las llama de *poro difuso u homogéneas*.
Los tyllos, son expansiones de las células de parénquima adyacentes a los vasos a través de las punteduras de paso entre ambos, incrementando notablemente la resistencia al flujo de los líquidos. Su aparición suele estar ligada al proceso de la duraminización.

.Las fibras constituyen el tejido de sostén de las frondosas. Son generalmente mucho más pequeñas que las traqueidas de las coníferas, pero sus paredes son más gruesas.
El tejido de almacenamiento de las frondosas, más abundante que en las coníferas, está formado por células de parénquima que presentan, tanto una disposición radial, como longitudinal.
Los radios leñosos de las frondosas, mucho más numerosos y de mayor tamaño que los de las coníferas, desempeñan, como en estas últimas, un importante papel en la distribución transversal de los líquidos y cumplen, entre otras, la misión de coexionar las células verticales. Es corriente, que, por su tamaño, los radios leñosos resulten en las frondosas visibles a simple vista.

1.2.3. Punteaduras de paso.

Un elemento anatómico de gran importancia por su contribución al flujo de agua en la madera es el de las punteaduras de paso, que se define como una ausencia o retroceso de la pared secundaria. Normalmente se dan por pares, de forma que coinciden las de dos células contiguas.

Tanto en las frondosas como en las coníferas, existen básicamente tres tipos de punteaduras:
Punteaduras areoladas. Se caracterizan por una constricción de parte de la puntedura hacia el lumen de la célula, formando una cámara o cavidad.
Punteaduras simples. Se caracterizan porque el anillo de la punteadura comunica totalmente con el lumen de la célula. Se presentan, normalmente, entre dos células de parénquima. Punteaduras semiaeroladas, se localizan fundamentalmente entre las células de parénquima y las del tejido conductor, encarando la parte aerolada con el lumen de estas últimas.

1.3. Composición química y organización de la pared celular

Las propiedades físicas y mecánicas de la madera, así como su resistencia natural a los agentes destructores, dependen de la naturaleza y distribución de las células que la componen, pero como a su vez las propiedades de estas son función de la composición y organización de la pared celular, a ella, como última responsable, debe dedicársele especial atención.

1.3.1. Composición química de la pared celular.

Las paredes de las células de la madera están constituidas por componentes primarios (celulosa, hemicelulosas y lignina) que son los que fundamentalmente determinan sus propiedades físicas y mecánicas y componentes secundarios (grasas, resinas, aceites, ceras, alcaloides, azúcares, sustancias minerales,
taninos, etc.) que pueden considerarse sustancias de impregnación extrañas a la pared celular, ya que se incorporan después de la constitución de la misma, lo cual no quiere decir que no tengan importancia en determinados casos.
Prescindiendo de los componentes secundarios, la composición media de las maderas de coníferas y frondosas es la siguiente:

	Coníferas	Frondosas
Celulosa	50%	50%
Hemicelulos	23%	26%
Lignina	27%	24%

1.3.1.1. Celulosa.

La celulosa es un polímero lineal insoluble en agua, formado por unidades de celobiosa, de fórmula empírica $(C_6H_{10}0_5)_n$, pudiendo ser n superior a 1.500. La celobiosa contiene ya, en si, el principio de la disposición helicoidal que aparece continuamente en la estructura submicroscópica de la pared celular, de forma, que el resto de glucosa 1 puede llevarse a coincidir con el resto 2, mediante un giro de 180° y una traslación igual a su longitud..

Interesa señalar la existencia en las moléculas de celulosa de grupos polares -0H y $-CH_2$ 0H, por lo que al ser también el agua un compuesto polar, ésta puede ser retenida por aquélla, lo que justifica su carácter higroscópico y, por consiguiente, el de la madera. El dipolo del agua es el que permite uniones más fuertes, debido al pequeño radio iónico del H^+ que le posibilita acercarse más a la otra molécula.
Estos puentes de hidrógeno, como se verá más adelante, tienen una gran importancia en los fenómenos de hinchazón y merma de la madera y justifican también la adhesión de las colas y barnices.

1.3.1.2. Hemicelulosas.

Son polímeros carbohidratados de fórmula empírica $(C_5H_80_4)$n y $(C_6H_{10}0_5)$n llamados respectivamente pentosanos y hexosanos, que sirven como sustancias de sostén o de reserva y son insolubles en agua. Los pentosanos se diferencian de la celulosa en que carecen del grupo $-CH_2$ 0H y los hexosanos en su menor peso molecular, siendo ambos, además, más fácilmente hidrolizables que la celulosa con ácidos diluidos y de mayor solubilidad en los alcalis que aquella. Las hemicelulosas al contener grupos - 0H son también hidrófilas y adherentes a las colas y barnices que posean grupos polares.

1.3.1.3. Lignina.

Polímero tridimensional, amorfo y con cadenas ramificadas, compuesto de unidades de fenil-propano. Su estructura no ha sido establecida aún de forma definitiva, pero posee grupos - 0H capaces de fijar agua, pero en proporción muy pequeña. Por ello, la lignina es prácticamente impermeable y protege al resto de la estructura de la pared celular a la que da rigidez y le proporciona su resistencia a la compresión.

1.3.2. Organización de la pared celular.

1.3.2.1. Fibrillas elementales y microfibrillas.

En la actualidad se puede considerar como unidad básica súper molecular de la estructura fibrilar de la pared de la célula a la *fibrilla elemental*, que está constituida por un conjunto de unas cuarenta moléculas de celulosa. Estudios realizados con rayos X y luz polarizada han llevado a la conclusión de que las fibrillas elementales presentan zonas cristalizadas y otras no cristalizadas, considerándose como la más admisible en la actualidad la teoría de la *micela flocada* que aboga por que las largas moléculas de celulosa pasan por zonas cristalinas, es decir, ordenadas, que tienen 600 A° de longitud media, y otras paracristalinas no ordenadas de unos 150 A° de longitud. Estas consideraciones, así como que la distancia entre moléculas de celulosa es inferior a 3 A°, nos explica que las fibrillas elementales no sean penetrables por las moléculas de agua cuyo diámetro es de 3,2 A°.

Al conjunto de fibrillas elementales, ocho aproximadamente, se le denomina *micro fibrilla*, pero como la distancia entre aquellas es superior al diámetro de las moléculas de agua, las micro fibrillas son penetrables por estas y consecuentemente pueden hincharse. Las micro fibrillas funcionan como una unidad, ya que el conjunto está ligado por valencias residuales.
Las micro fibrillas, a su vez, se mantienen juntas unas a otras en haces por medio de valencias residuales, y entran a formar parte con diferentes proporciones y orientación, junto a las hemicelulosas y lignina, de las distintas capas que constituyen la pared celular.

1.3.2.2. Constitución de la pared celular.

Esquemáticamente la pared celular está formada por:
Lámina central o pared intercelular. Formada principalmente por lignina y hemicelulosas, se distingue de la pared primara y de la secundaria por este hecho, así como por ser isótropa, es decir, presentar las mismas propiedades en todas direcciones.

Pared primaria. Constituida por celulosa más una gran proporción de hemicelulosas y lignina, es anisótropa. Debido entre otras razones a su pequeño espesor, se tiene muy escasa información de su estructura. No obstante, puede afirmarse que las micro fibrillas tienen una orientación irregular, con tendencia a ser perpendiculares al eje de la célula.

Pared secundaria. Está constituida por celulosa con pequeñas incrustaciones de lignina y presenta tres capas bien diferenciadas:

Capa exterior S_1. Muy delgada, parece que está formada por varias laminas en las que las micro fibrillas de cada una están orientadas helicoidalmente en ángulos opuesto de 70° - 90° con la vertical o eje de la célula.

Capa media S_2. Es la más gruesa de las tres capas de la pared secundaria Compuesta como la S_1 de láminas, sin embargo no existe evidencia de que haya cruce en la orientación de las micro fibrillas que forman con el eje de la célula un ángulo no superior a 30°.

Capa interna S_3. Es la de menor grosor, no existiendo en algunas ocasiones. Sus micro fibrillas están orientadas formando un ángulo de 70°-80° con el eje de la célula.

1.3.3. Consideraciones sobre el comportamiento de los constituyentes de la pared celular.

Si se eliminan los componentes inorgánicos y la lignina, el residuo de celulosa y hemicelulosas permanece en un bloque prácticamente de las mismas dimensiones originales. En la actualidad, se considera que las cadenas de celulosa se mantienen en posición relativa por medio de sus enlaces con las cortas cadenas de las hemicelulosas. De igual manera, si se quitan las holocelulosas (celulosa + hemicelulosas), las dimensiones tampoco varían, apareciendo, no obstante, los correspondientes espacios vacíos en la masa de lignina.

Para destacar el papel que desempeña cada uno de los constituyentes de la pared celular, *KLAUDIZT* analizó los fenómenos mecánicos que se producen al deslignificarla, llegando a las siguientes conclusiones:
La celulosa es el compuesto elástico por excelencia de la pared celular y tiene gran resistencia a la tracción. Su papel de principal componente estructural de la madera se debe a que la unión de puentes del hidrógeno es una de las más fuertes, por lo que las zonas cristalinas de las fibrillas elementales son impenetrables por las moléculas de agua. Por otra parte, estas uniones impiden el desplazamiento relativo de las moléculas de celulosa en la fibrilla elemental.
La menor longitud de las cadenas de hemicelulosas origina que sea un elemento de armado de la pared celular menos importante que la celulosa. Sin embargo, pueden considerarse como agente encolante que mantiene unidas las micro fibrillas y evitan las rajas que tienden a producirse cuando las células de la madera son sometidas a esfuerzos de torsión, flexión o compresión. Su efecto de refuerzo se estima que se establece mediante enlaces covalentes hemicelulosas-lignina y hemicelulosas-celulosa.

Teniendo en cuenta la estructura fibrilar de la celulosas, el papel de la lignina en la pared celular es cementante de las micro fibrillas. Su existencia hace que estas trabajen conjuntamente en el interior de la pared celular. Al desaparecer la lignina las micro fibrillas actúan por separado, por lo que la resistencia del conjunto disminuye. Por otra parte, la lignina es un protector impermeabilizante de la hidrófila celulosa, por lo que mitiga la considerable disminución de la resistencia de esta última al absorber agua que actúa como lubricante entre las micro fibrillas. En resumen, la lignina además de ser el principal componente de la pared celular resistente a la compresión, actúa disminuyendo su higroscopicidad y dando rigidez a las estructuras fibrilares de las células.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, la estructura de la pared celular puede considerarse esquemáticamente como un conjunto de varillas elásticas, las micro fibrillas, embebidas en un medio isótropo, la lignina, más o menos plástico. En otro sentido, se puede también afirmar que la madera es un cuerpo poroso que presente además de los lúmenes de las células, espacios huecos entre las fibrillas elementales y las micro fibrillas.

1.4. Relaciones agua-madera

Estas relaciones son tan especiales e importantes que constituyen uno de los puntos que deben estudiarse con más detenimiento, ya que de la humedad de la madera dependen la mayor parte de sus propiedades físicas y mecánicas, su estabilidad dimensional y su resistencia al ataque de determinados organismos xilófagos.

El agua es el vehículo de transporte que emplean las plantas para su alimentación. Esta actividad transportadora está centrada, fundamentalmente, en la albura, de forma que las células que la constituyen se encuentran saturadas de agua a fin de permitir que existan columnas ininterrumpidas de agua desde las raíces a las hojas.

Cuando las células de la madera pierden esta función conductora, o cuando por diversas causas exógenas se interrumpen las columnas ascendentes, el agua contenida en los lúmenes celulares puede ser total o

parcialmente desplazada por gases, incluyendo el vapor de agua, permaneciendo la pared celular completamente saturada. Por tanto, la madera verde contiene agua en tres formas: líquida rellenando total o parcialmente los lúmenes celulares, vapor de agua rellenando los espacios vacíos de los lúmenes celulares y en forma higroscópica, ligada al interior de la pared celular.

Las dos formas principales en que puede encontrarse el agua en la madera son, por tanto:

Agua libre. Es la existente en forma líquida dentro del lumen de las células. Una vez perdida por la madera no puede ser tomada a partir de la humedad atmosférica y sólo se podrá recuperar por inmersión directa en agua. No influye en la hinchazón o merma ni en sus propiedades mecánicas.

Agua ligada. Es el agua retenida por la pared celular hasta su saturación completa y responsable de los fenómenos de hinchazón y merma. Como la absorción de este agua se debe a las propiedades higroscópicas de la madera, se llama también "agua higroscópica" o "de saturación de la pared celular".

Estos términos de libre y ligada son relativos, desde el mismo momento en el que el agua contenida en los lúmenes celulares está sometida a fuerzas capilares y, por tanto, no se encuentra en el mismo estado termodinámico que el agua contenida en un recipiente de mayor capacidad. Además, el agua contenida en los lúmenes celulares puede contener elementos solubles que modifican su estado termodinámico, haciéndola menos "libre" que el agua sin solutos.

La madera, debido a la naturaleza polar de una parte importante de sus componentes, es un material higroscópico, que disminuye de volumen cuando pierde humedad (agua) por debajo del punto de saturación de las fibras y aumenta de volumen cuando su humedad crece.

Se entiende por contenido de humedad o simplemente humedad de la madera, a la relación del peso del agua contenida en la madera, al peso de la madera anhidra

$$h = \frac{P_h \cdot P_o}{P_o}$$

P_h = Peso de la madera a la humedad
P_o = Peso anhidro de la madera
h = Humedad de la madera

Es habitual multiplicar el valor h por 100, para de ese modo obtener la humedad referida al peso seco en porcentaje.

1.4.1. Humedad de equilibrio en la madera.

Puede afirmarse que existe un equilibrio dinámico entre el agua ligada o de impregnación de la pared celular y el estado higrotérmico del medio ambiente, denominado *equilibrio higroscópico de la madera.*

En efecto, si se expone una madera seca a una temperatura y humedad relativa determinadas, las moléculas de agua del medio ambiente penetran por los espacios existentes en el tejido leñoso y quedan retenidas en ellos. De igual forma, si partimos de una madera que tenga completamente saturadas sus paredes celulares, perderá moléculas de agua. Estos procesos, llamados respectivamente de *sorción y desorción*, continúan hasta que se establece un estado de equilibrio dinámico entre las moléculas que entran y salen de la madera y son típicos de sólidos con una estructura capilar compleja.

La sorción y la desorción constituyen un fenómeno, que si bien es interpretado de diversas formas por distintos autores, lo más corriente es considerarlo como un fenómeno superficial.
De acuerdo con esto, se trataría de un fenómeno proporcional a la superficie, tanto interna como externa del absorbente (madera), que tiene lugar cuando las moléculas de absorbato (vapor de agua) se fijan sobre la superficie del absorbente en virtud de las diferentes fuerzas activas que entran en juego, que pueden ser de naturaleza muy diversa. Por un lado se encuentran las de tipo físico (fuerzas de Van der Waals) que dan lugar a *la Fisisorción,* y por otro las de tipo químico (de enlace) que dan lugar a la Quimisorción.

La importancia de la sorción y la desorción en la madera se ve favorecida enormemente por una serie de propiedades de esta, entre las que destacan su gran superficie interior que varía según el peso específico de 20 a 280 m^2 por cm^3, y la afinidad entre los grupos polares -0H de las cadenas de celulosa y hemicelulosas y las moléculas de agua.

Como la constitución química y la estructura de la pared celular varían relativamente poco de unas a otras especies de madera, en la práctica se admite que los valores de equilibrio higroscópico son iguales para todas ellas, lo que permite con solo gráfico determinar, con bastante aproximación, la humedad que alcanza cualquier madera cuando está expuesta a unas determinadas condiciones higrotérmicas.

1.4.2. Etapas de la sorción.

Vuélvase a considerar una madera completamente seca, expuesta en un ambiente de humedad relativa y temperatura determinadas. El proceso de sorción de agua tendrá lugar según las siguientes etapas:

Sorción molecular. En esta fase, en la que predomina la quimisorción, las moléculas de agua, de naturaleza fuertemente polar, penetran por todos los espacios posibles del tejido leñoso y, al acercarse a los grupos polares de las fibrillas elementales, quedan retenidas sobre su superficie, formando, debido a lo fuerte de la unión, una casi asociación cristalina. El agua que forma

esta capa monomolecular tiene por ello la alta densidad aparente del 1,3 g/cm^3.

Como esta forma de sorción, llamada molecular, tiene lugar únicamente en la superficie de las fibrillas elementales, es natural que comience en las zonas amorfas que poseen un mayor número de hidroxilos libres, produciendo por consiguiente en su primera fase muy poco hinchazón de la pared celular, ya que las zonas cristalizadas prácticamente no se desplazan. No obstante, una vez saturados los grupos hidroxilos de las zonas amorfas, el agua empieza a situarse también en los de la superficie de los cristalinos. Aunque no puede fijarse exactamente el punto final de esta primera etapa de la sorción, parece que finaliza cuando la madera tiene una humedad de aproximadamente entre el 6 y el 8%.

Adsorción en capas multimoleculares. La segunda etapa de la sorción la constituye la adsorción en capas multimoleculares. Como se ha indicado, la madera tiene una gran superficie interna con intersticios o grietas intermicelares que constituyen un sistema capilar submicroscópico. En esta inmensa superficie interior se produce la adsorción sobre las moléculas de agua sorbidas molecularmente, llenándose los espacios intermicelares. El final de esta etapa, en la que predomina la fisisorción, viene a corresponder a una humedad de la madera del 15% al 16%, y tiene lugar cuando comienza la formación de meniscos.

Condensación capilar. Como puede admitirse que los meniscos semiesféricos sólo se producen, considerando capilares cilíndricos y moléculas de agua en forma de esferas rígidas, cuando haya sitio entre sus paredes para al menos una capa molecular sextuple que permita con su fusión una superficie límite aproximadamente semiesférica, la condensación capilar de vapor de agua no podrá producirse en espacios capilares con un radio menor próximo a los 9 A°. Esto no significa que en todo capilar que supere esta dimensión se produzcan condensaciones de moléculas de agua, ya que este fenómeno sólo tendrá lugar, para cada temperatura y humedad relativa, en capilares de radio igual o inferior al dado por la ecuación de Kelvin, también conocida como de Thompson, que tiene por expresión:

$$r = \frac{2\sigma V_l}{R\,T \ln(1/h)}$$

donde:

- r : radio del menisco, en cm
- σ : tensión superficial (72,75 erg/cm^2 a 20ºC)
- V_l: volumen molar del agua (18 cm^3/mol)
- R : constante de los gases perfectos (8,3143 10^7 erg/ºK mol)
- T: temperatura absoluta
- h : presión relativa de vapor

En condiciones isotermas h = Hr/100, siendo Hr la humedad relativa del aire en contacto con el menisco, expresada en tanto por ciento.

A título orientativo se indican a continuación los radios capilares obtenidos para diversas humedades a una temperatura de 23°C.

Humedad relativa	Radio capilar
%	Cm
99.9	1,06.10
90	1 ,01.10^{-6}
80	4,78.10^{-7}
70	3,05.10^{-7}
60	2,07.10^{-7}
50	1,54.10^{-7}
40	1,16.10^{-7}

En resumen, la condensación capilar se producirá exclusivamente en los capilares de radio comprendido, entre 9 Aº y el calculado con la fórmula Thompson.

El final de la etapa de condensación capilar, a efectos prácticos, se corresponde con una humedad de la madera próxima al 30%, que recibe el nombre de *punto de saturación de las fibras*.Es necesario indicar, que, para unas condiciones higrotérmicas dadas, no tienen por que producirse las tres etapas de la sorción, pudiéndose detener esta en cualquiera de ellas. Igualmente, en la realidad, la sorción molecular, la adsorción y la condensación capilar no están perfectamente diferenciadas, por lo que en una misma pieza de madera los tres procesos pueden estar sucediéndose al mismo tiempo, si bien con predominio notable de alguno de ellos.

1.4.3. **Hinchazón y merma.**

Una de las propiedades más importantes de la madera, derivada de los fenómenos de sorción y desorción es la hinchazón y merma. Para el estudio de este fenómeno de variación de volumen, como consecuencia de los cambios de humedad, es necesario definir los coeficientes de hinchazón volumétrica

$$\alpha_{vh} = \frac{V_h - V_o}{V_o}$$

y de contratación o merma:

$$\beta_{vh} = \frac{V_h - V_o}{V_h}$$

El aumento de volumen que experimenta la madera al hincharse puede considerarse aproximadamente igual al volumen de agua sorbida, si se prescinde de la pequeña contracción que sufre el agua contenida en la pared celular y del insignificante estrechamiento que experimentan los poros de la misma.

Se ha comprobado experimentalmente que la variación volumétrica externa depende linealmente del contenido de humedad desde 0 al 28%, siendo mayor cuanto más alta es la densidad de la madera, por lo que puede admitirse que:

$$\alpha_{vh} = h \cdot \rho_o$$

donde α_{vh} es el coeficiente de hinchazón hasta la humedad h y ρ_o es la densidad anhidra. La hinchazón máxima sería:

$$\alpha_{v\,máx} = 28\,\rho_o$$

Si la madera fuese un material isótropo, la variación de dimensiones lineales en todas las direcciones sería igual, pero al ser anisótropa, ocurre que el mayor cambio dimensional tiene lugar en la dirección tangencial a los anillos anuales. En sentido radial, la variación es considerablemente menor que en la dirección tangencial, mientras que en el sentido longitudinal es tan pequeña que puede casi siempre ser despreciada.

La diferencia entre las mermas transversales de la madera está en mayor o menor medida relacionada con: la alternancia de los incrementos de madera de primavera y de verano dentro del anillo anual, la influencia de los radios leñosos y las características de la estructura de la pared celular, como son las modificaciones del ángulo de las fibrillas por las punteadoras existentes y la composición de la laminilla media.

1.4.4. Secado de la madera.

En una madera verde recién cortada existe agua libre que ocupa total o parcialmente los lúmenes o poros de las células y agua ligada que retiene la pared celular hasta su saturación completa. Desde el instante de la corta comienza el secado, que continúa hasta alcanzar la humedad de equilibrio correspondiente a las condiciones ambientales en que tiene lugar.
En este fenómeno existen varias fases, perfectamente diferenciadas:

Fase primera: En esta fase el agua libre se encuentra presente tanto en el interior como en el exterior de la pieza. Si el contenido de humedad inicial de la madera es elevado se puede admitir que la superficie está recubierta de una capa de agua. En estas circunstancias el agua se evapora desde esta superficie como si desde una superficie de agua libre se tratara.

Fase segunda: Comienza cuando ya no es posible admitir que la superficie exterior de la madera está rodeada de una capa de agua. En estas circunstancias se produce un fenómeno de evaporación interior, en el seno de la pieza de madera, caracterizado por una menor superficie de evaporación y, por tanto, por una velocidad notablemente inferior.

A lo largo de esta segunda fase, el frente de evaporación interno se va desplazando hacia el corazón de la pieza, al crearse en el interior de la madera un flujo de masa líquida a través de los lúmenes y punteaduras de interconexión.

La presión que impulsa este flujo es la diferencia entre las presiones del agua en fase gaseosa y fase líquida y tiene el siguiente valor:

$$P_o - P_l = \frac{2T}{r}$$

donde:

P_o = presión en fase gaseosa
P_l = presión en fase líquida
T = tensión superficial de líquido
r = radio del capilar

Esta tensión hidrostática actúa sobre las paredes celulares de los lúmenes que en ciertos casos pueden estar completamente llenos de agua (sin ninguna burbuja de aire), pudiendo entonces alcanzar un valor de hasta 1400 KPa para punteaduras de 0,1 µm, la cual excede para algunas especies el límite de resistencia de las paredes, dando como resultado un colapso o hundimiento de las células que se manifiesta internamente como una contracción excesiva. Si bien en maderas normales estas deformaciones o contracciones que tienen carácter irreversible son en general fácilmente evitables, si el proceso de secado se realiza de forma correcta, no sucede lo mismo con las maderas rescatadas de un medio subacuático que tienen sus lúmenes llenos de agua y las paredes celulares degradadas, y, por tanto, con menor resistencia.

Fase tercera: Comienza esta fase cuando ya no existe agua libre en la madera, sino ligada. El fenómeno rector en esta fase no es ya la evaporación sino la difusión de la humedad, fenómeno consistente en un flujo molecular bajo la influencia de un gradiente de concentración.

Es decir, por debajo del punto de saturación, cuando solamente queda el agua ligada a la pared celular, la humedad se desplaza desde el interior a la superficie por difusión de las moléculas de agua a través de las paredes celulares y cavidades. Esta pérdida de agua higroscópica de la pared celular es la que origina el fenómeno de merma citado en el punto 1.4.3. que, por su reversibilidad, obliga a que no varie la humedad de la madera si se desea conseguir su estabilidad dimensional.

De acuerdo con todo lo anterior, el estudio del mecanismo del movimiento del agua en la madera debe ser abordado teniendo en cuenta: el fenómeno de evaporación superficial del agua en la madera, el movimiento del agua libre en el interior de la madera y el fenómeno de la difusión.

2. Agentes destructores

Se entiende por agente destructor toda causa que directa o indirectamente interviene en el deterioro o alteración de la madera, pudiéndose hacer una primera clasificación de los mismos en vivos (bióticos) y no vivos (abióticos).

2.1. Agentes destructores bióticos

Como toda materia orgánica, la madera y sus derivados pueden sufrir el ataque de los organismos vivos, fundamentalmente hongos e insectos que, cuando encuentran condiciones favorables a su acción y desarrollo, pueden llegar incluso a destruirla completamente. Una condición de su adaptación a la madera en cuanto espacio vital y base de nutrición, reside en la facultad de fraccionamiento mecánico del material para transformarlo en alimento asimilable, así como en la posibilidad de utilizar los componentes químicos de la misma, de los que más de la mitad son hidratos de carbono, fundamentalmente celulosa químicamente muy resistente, y un tercio lignina todavía más difícil de descomponer. Se trata, en todo caso, no lo olvidemos, de fenómenos naturales e indispensables para la vida, aunque, eso sí, perjudiciales para el hombre en el cuadro de la utilización tecnológica de la madera.

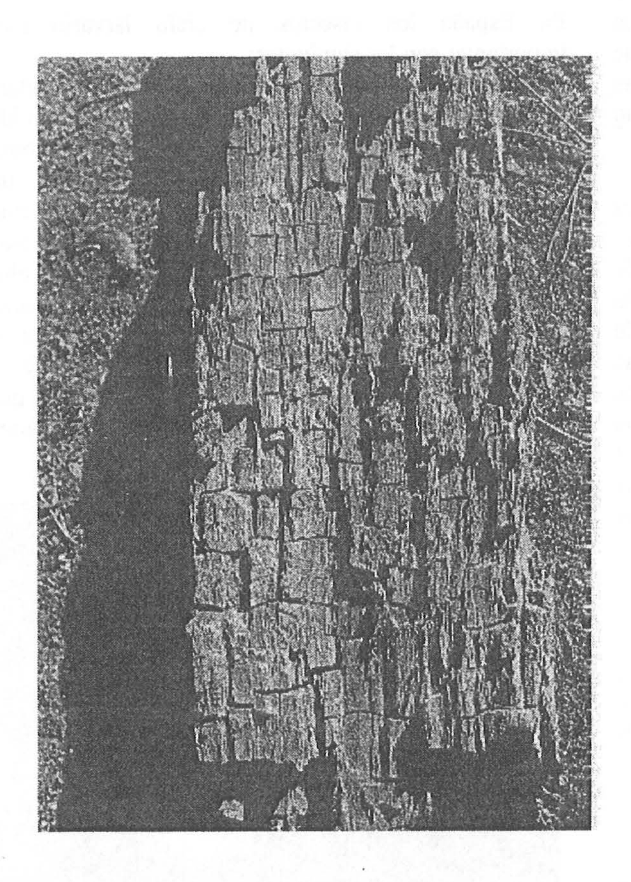


FIGURA 2: Ejemplo típico de Pudrición parda o cúbica de madera de pino

2.1.1. Hongos

Los hongos son vegetales inferiores, cuyo cuerpo vegetativo constituido por filamentos microscópicos llamados hifas no posee ni tallo, ni raíz, ni hojas. También están desprovistos de clorofila, por lo que no son capaces de elaborar sustancias orgánicas a partir del anhídrido carbónico de la atmósfera, el agua y la energía solar, teniendo que alimentarse de compuestos orgánicos ya existentes, a los que transforman en sustancias más elementales con la ayuda de enzimas producidas por ellos mismos. Los que atacan a la madera, es decir, los que fabrican enzimas capaces de degradar a todos o a alguno de sus componentes, reciben el nombre de hongos xilófagos, e incluyen aquéllos cuya acción tiene por efecto modificar exclusivamente el aspecto de la madera y sobre todo su color (hongos cromógenos) y los que modifican notablemente sus propiedades mecánicas y físicas (hongos de pudrición). Todos ellos necesitan oxígeno gaseoso y cantidades elevadas de agua, actuando con más intensidad cuando éstos se encuentran en la relación adecuada, siempre que la temperatura, cuyo óptimo suele estar comprendido entre los 20 y 25°C, sea igualmente favorable.

Los hongos cromógenos son incapaces de degradar la pared celular, o lo hacen en muy pequeña medida, ya que se alimentan de las sustancias de reserva presentes en las células de la albura, por lo que limitan su ataque a la madera no duraminizada. La coloración más frecuente que producen en las coníferas es la conocida como azulado, que si bien tiene poca importancia desde el punto de vista técnico, representa un defecto estético importante con amplias repercusiones económicas. Hay que tener en cuenta la aparición de este tipo de alteración en carpinterías exteriores, en las que nos advierte que las condiciones de humedad y temperatura son favorables para el desarrollo posterior de los hongos de pudrición.

Los hongos de pudrición constituyen el grupo de los hongos xilófagos propiamente dichos, que por su dotación de enzimas son capaces de destruir los componentes elementales del esqueleto leñoso de la madera. La pudrición afecta notablemente a las propiedades mecánicas, en particular la resistencia estática y dinámica, encontrándose pérdidas importantes de las mismas incluso en ataques aparentemente ligeros. Si bien sus condiciones óptimas de desarrollo varían sensiblemente de unas especies a otras, podemos decir que en ningún caso una humedad de la madera inferior al 22-24% permite satisfacer sus necesidades de agua. Por ello, toda madera, cualquiera que sea su duración natural, si se pone seca. en obra, no será atacada por los hongos durante todo el tiempo que se mantenga en ese esado. Como consecuencia, la primera regla de oro que ha de observarse, será la de emplear madera bien seca y, la segunda, más difícil de cumplir, pero no menos importante, es que la puesta en obra se haga de tal forma que no exista posibilidad de rehumidificación, lo

que exige un mantenimiento eficaz. Si no se tienen garantías de evitar la rehumidificación, es aconsejable un tratamiento preventivo con un protector fungicida. Una clasificación de las pudriciones, en función de las alteraciones que se producen en el color de la madera y en el aspecto que ésta presenta cuando la acción de los hongos xilófagos es intensa, por otra parte ampliamente utilizada en la literatura sobre protección, a pesar de sus imprecisiones, es la siguiente:

Pudrición blanca. Los hongos tienden a destruir más lignina que celulosa, dejando al final un complejo celulósico más o menos blanquecino que no suele presentarse uniforme, sino en forma de alveolos o vetas blancas. Esta pudrición deja un resíduo fibroso que conserva una resistencia elástica apreciable, por lo que se la conoce también como pudrición fibrosa. Sin embargo, existen hongos que destruyen la celulosa y blanquean los compuestos residuales de lignina no atacados, por lo que la pudrición presenta aparentemente el aspecto de blanca, sin realmente serlo, como puede comprobarse observando su estructura.

Pudrición parda. Los hongos concentran fundamentalmente su ataque sobre la celulosa dejando un residuo formado por lignina más o menos alterada que puede disgregarse fácilmente con los dedos. En este tipo de pudrición, la madera al principio del ataque conserva intacta su estructura celular exterior, pero si disminuye su humedad, aparecen fendas de contracción en las direcciones radial, tangencial y transversal, que le dan un aspecto característico que ha determinado que a este tipo de daño se le conozca también como pudrición cúbica.

Pudrición blanda. Esta pudrición, originada por hongos inferiores, aparece con frecuencia en maderas puestas en contacto con el suelo. No se diferenció del resto de las pudriciones hasta 1913 (Bailey),estando en la actualidad perfectamente definida, tanto por el tipo de hongos que la producen, como por la forma en que se desarrolla su ataque. Efectivamente, los hongos causantes de la pudrición blanda atacan con preferencia la celulosa de la pared secundaria de la célula, dando a la madera, cuando el grado de humedad es elevado, una consistencia blanda parecida a la que .presenta un queso fresco.

2.1.2 Insectos.

Entre los animales terrestres destructores de la madera, los insectos son, con mucho, los más importantes, destacándose entre ellos los coleópteros, y en las regiones cálidas las termitas.

2.1.2.1 Insectos de ciclo larvario

Las especies de coleópteros que atacan madera seca son relativamente reducidas en número, pero tiene gran importancia como parásitos de obras de arte, muebles, carpintería y estructuras de edificios. Se caracterizan porque en las primeras fases de su vida, en las que reciben el nombre de larvas, presentan, tanto en la forma como en su comportamiento y manera de alimentarse, diferencias muy notables con los adultos reproductores, llamados imagos, que viviendo solamente algunas semanas no tienen, en la mayor parte de los casos, necesidad alguna de alimentarse. Las larvas, por el contrario, se nutren de la madera en la que viven, pudiendo sucederse varias generaciones en una misma pieza hasta su destrucción completa. El ataque es independiente de las condiciones de puesta en obra, ya que, al contrario de los que ocurre con los hongos, el factor humedad interviene muy poco en su desarrollo. Esto tiene una consecuencia de gran importancia, pues ninguna medida de tipo arquitectónico puede proteger la madera de sus ataques, por lo que los tratamientos preventivos deberán tener carácter obligatorio.

Respecto al ataque de este tipo de insectos, es importante hacer notar que los orificios observados en una madera son una prueba inequívoca de que al menos ha vivido en ella una generación de los mismos, pues siempre son perforados por los jóvenes adultos, después de completar su ciclo larvario, con objeto de salir al exterior para aparearse y reinfectar la misma u otras maderas. Son estos orificios de salida, ante la ausencia de insectos adultos, los que permiten determinar si existe o ha existido un ataque y el tipo del mismo.

En España los insectos de ciclo larvario más importantes son los siguientes:

Cerambicidos. El que produce más daños en la madera puesta en obra es el Hylotrupes bajulus L., conocido como carcoma grande, (figura 3). Ataca sólo la albura de las coníferas, por lo que las especies no duraminizadas (abeto y picea) pueden ser totalmente destruidas. Esto se debe a que la albura tiene más albúmina que el duramen y, por tanto, mayor valor nutritivo. Con el paso del tiempo se producen modificaciones en la composición de la albúmina y disminuye el contenido de vitaminas, por lo que el riesgo de infección es menor aunque no se elimina por completo, ya que maderas antiguas de incluso 200 años pueden contener todavía larvas vivas.

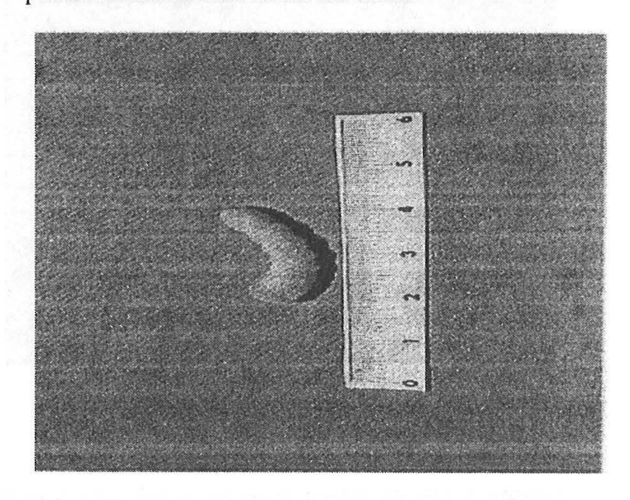


FIGURA3: Larva de Hylotrupes bajulus L (carcoma grande).

El imago puede alcanzar una longitud de 10 a 20 mm., es de color pardo-negruzco y se caracteriza por tener dos grandes antenas. Después de fecundadas, las hembras ponen huevos en las fendas de la madera y en los intersticios de los ensamblajes que, al eclosionar, dejan en libertad larvas muy pequeñas que penetran en el tejido leñoso donde aseguran su alimento. Estas larvas, que pueden llegar a alcanzar una longitud de 20 a 22 mm. y un diámetro de 6 mm. perforan galerías de sección oval orientadas generalmente en el sentido de la fibra. La duración de su ciclo vital es muy variable, pudiendo estar comprendida entre 2 y 12 años según que las condiciones de temperatura y valor alimenticio de la madera sean más o menos favorables. La larva pasa por el estado de pupa antes de transformarse en insecto perfecto, saliendo éste al exterior por orificios de 5 a 7 mm de sección oval. El ataque se detecta por los orificios de salida de los adultos, por hinchamientos en la superficie de la madera que se corresponden con la presencia de galerías aisladas del exterior por una fina película de madera, y también, observando interiormente las galerías, por sus paredes finamente estriadas y el serrín muy compacto que contienen.

Daños del tipo parecido al descrito, pueden observarse en la madera de ciertas especies de frondosas, pero están producidas por otros cerambicidos como el Stromatium folvum Villers y el Hespe rophanes cinereus Villers, cuyos daños son bastante frecuentes en los países mediterráneos.

Lictidos. Estos insectos, conocidos como polilla, están representado en España fundamentalmente por dos especies: una autóctona, Lyctus linearis Goeze, y otra de origen tropical, pero perfectamente aclimatada y más activa, Lyctus brunneus Stephens. Ninguna madera de coníferas puede ser atacada por estos insectos, cuyos daños se limitan a ciertas especies de frondosas que cumplen las siguientes condiciones: poseer vasos de un diámetro igual o superior a 0,07 mm., tamaño a partir del cual las hembras pueden depositar en ellos sus huevos; presentar un contenido de almidón elevado, superior al 3% con respecto al peso anhidro y tener una humedad comprendida entre el 6 y el 32% que, por otra parte, es prácticamente la de toda madera puesta en obra cualquiera que sea su empleo. Es necesario indicar que las hembras no pueden hacer la puesta en una madera si los vasos están obstruidos por una capa sólida y espesa de barniz o pintura, pero para que esto sea realmente eficaz, la capa protectora debe ser uniforme y sin defectos, lo que raramente ocurre en la práctica. Por otra parte, el hecho constatado de que el valor nutritivo de la madera para los líctidos disminuye considerablemente con el tiempo, permite llegar a conclusiones sobre la antigüedad de una obra de arte. Así, por ejemplo, una talla procedente de un país tropical con larvas vivas no puede tener. una antigüedad superior a unos pocos años.

Los líctidos adultos tiene forma alargada, una longitud que varía entre 3 y 7 mm., en función del valor nutritivo de la madera donde las larvas se han desarrollado, y color pardo oscuro o pardo rojizo. Las hembras fecundadas ponen huevos en el interior de los vasos de la madera que, al eclosionar dos o tres semanas después de la puesta, dejan en libertad larvas de color blanquecino que pueden alcanzar hasta 4 mm de longitud. Estas larvas perforan galerías paralelas a la fibra, donde van acumulando sus excreciones en forma de fino serrín de parecida consistencia a los polvos de talco. El ciclo vital suele ser de un año, pero puede reducirse a 3 ó 4 meses si las condiciones, particularmente la temperatura, son favorables. Después de una pupación que dura alrededor de tres semanas, los adultos salen de la madera por orificios circulares de 1 a 2 mm. de diámetro, pudiendo incluso atravesar chapas de especies de madera resistentes a los ataques larvarios, así como películas de pintura o barniz. Es muy difícil de diagnosticar un ataque de líctidos antes de que aparezcan los primeros orificios de salida y la reinfestación de una madera se produce muy rápidamente.

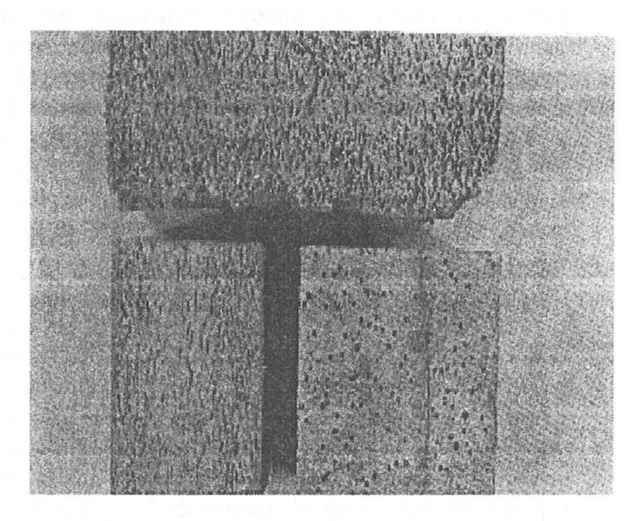


FIGURA 4: Detalle de los orificios de salida de los adultos y aspecto de las galerías perforadas por larvas de Anolium Punctatum de Geer.

Anóbidos. De este grupo de insectos, cuyos daños conocemos vulgarmente como carcoma, debemos destacar, por su importancia, al Anobium punctatum DeGeer, que ataca la albura de coníferas y frondosas e incluso, en algunas ocasiones, el duramen, sobre todo cuando presenta pudrición, aunque ésta sea débil. Los adultos alcanzan una longitud de 3 a 5 mm. y son de color pardo negruzco. Las hembras ponen sus huevos en las superficies rugosas de la madera, en las fendas e incluso en antiguos orificios de salida. Después de 4 ó 5 semanas nacen de los huevos pequeñas larvas blancas y arqueadas que penetran en la madera perforando galerías con serrín más granuloso y áspero al tacto que el de los líctidos, (figura 4). El ciclo vital de estos insectos es de 3 e incluso más años. Después de la pupación, los adultos salen de la madera perforando orificios circulares de 2 a 3 mm. de diámetro. La presencia de la primera generación de insectos no es fácil de detectar hasta la aparición de los primeros orificios de salida, pero el ataque de las sucesivas generaciones se revela con

frecuencia por la aparición de numerosos montoncitos de serrín que las larvas evacuan al exterior por antiguos orificios. Es frecuente su presencia en museos, iglesias y locales en los que la temperatura próxima a los 20ºC les es favorable. Por otra parte, al ser los adultos poco amantes de la luz, prefieren para depositar sus huevos los lugares relativamente oscuros. Es importante observar que las calefacciones centrales de los edificios constituyen un método eficaz para combatir los ataques de estos insectos, debido no sólo a que las larvas necesitan para desarrollarse una humedad relativa del aire superior al 60%, sino también a que para iniciar la pupación y por consiguiente completar su ciclo biológico, les son imprescindibles los fríos invernales.

Otro anóbido de interés es el Xestobium rufovillosum Geer que puede producir daños a la mayor parte de las coníferas y frondosas previamente atacadas por un hongo, incluso cuando este ataque es antiguo y la madera se encuentra seca. El adulto tiene un aspecto general parecido al del Anobium punctatum, pero de longitud superior (6-8 mm.). Su color es pardo oscuro con zonas más claras debido a la implantación de pelos, y su cabeza se encuentra disimulada bajo el tórax. La biología es parecida a la del Anobium punctatum, pero las hembras ponen mayor número de huevos y su ciclo vital es normalmente de 5 años, aunque puede acortarse cuando el ataque previo de los hongos sea muy intenso.

La larva, de color blanco o crema, puede alcanzar antes de la pupación 11 mm. de longitud. Los orificios de salida de los adultos alcanzan hasta 4 mm de diámetro y las galerías están llenas de un serrín áspero al tacto. Es curioso destacar la presencia de muy pocos orificios de salida en maderas muy atacadas, lo que se explica por la posibilidad que tienen estos insectos de aparearse y poner los huevos en el interior de las galerías sin necesidad de salir al exterior. El nombre de "reloj de la muerte" que se aplica a veces a las carcomas, corresponde exclusivamente al Xestobium rufovillosum y procede del sonido del golpeo, producido por los insectos adultos durante la época de apareamiento, consistente en cuatro o cinco golpes producidos en menos de un segundo por la parte frontal inferior de la cabeza del insecto al chocar contra la superficie de la madera, que son respondidos por otro insecto golpeando con el mismo ritmo.

En España es frecuente encontrar daños producidos por otros anóbidos, destacando por su importancia el Calymmaderus solidus (Kiesenwetter 1877), con incidencia en toda la cornisa Cantábrica, el Oligomerusia ptilinoides Woll y el Nicobium castaneum Ol., cuyo ciclo biológico, en todos los casos, es análogo al de las especies anteriormente descritas.

2.1.2.2 Insectos sociales.

Las termitas son insectos que forman colonias con una organización social parecida a la de las hormigas y abejas, produciendo sus mayores daños en las zonas tropicales y subtropicales. Se han adaptado no obstante a las zonas templadas, encontrándose en España tres especies de las que solamente dos atacan la madera puesta en obra: Reticulitermes lucífugus Rossi (figura 5), especie subterránea que vive en la Paninsula y Baleares produciendo daños de gran intensidad y Criptotermes brevis Walker, especie que anida en madera seca y que produce sus principales daños en las Islas Canarias.



FIGURA 5: Colonia de Reticulitermes Lucifugus Rossi

El Reticulitermes lucífugus hace sus nidos en la tierra donde encuentra una atmósfera húmeda que le es imprescindible, así como una temperatura moderada y casi constante. A partir del centro de la colonia estas termitas construyen numerosas galerías para alcanzar la superficie del suelo y las maderas de las que se alimentan. En una colonia de termitas las funciones de reproducción están encomendadas a la pareja real, mientras que las demás actividades son realizadas por obreros y soldados; sin embargo, si desaparece la pareja real, puede ser sustituida en su función por machos y hembras neoténicos, que adquieren naturaleza sexual, pero no forma alada. Esto último tiene gran importancia, ya que un grupo de obreros, ninfas y soldados aislados accidentalmente de una colonia, pueden reconstruir perfectamente una nueva, lo que facilita la propagación de la especie.

Para llegar a las maderas que le sirven de alimento, albura y duramen de la mayoría de las coníferas y frondosas, los obreros son capaces de perforar los materiales no demasiado duros como el yeso y sobrepasan los más duros, tales como el hormigón armado, mediante túneles y puentes de un material oscuro formado por saliva, excrementos y tierra. La presencia de las termitas en la madera se traduce en cavidades paralelas, que siguen la dirección de la fibra respetando su superficie y que tapizan de un material constituido de saliva, excrementos y partículas de madera., Esta forma de actuar hace que su presencia a

veces no pueda percibirse hasta que los daños son de gran importancia.Los síntomas que permiten detectar un ataque de termitas son: la existencia de galerías, en la superficie de los materiales duros, y caminos disimulados en el yeso o recubrimientos de los muros, a veces observables por pequeños agujeros negros de unos 2 mm, de diámetro recubiertos interiormente de una sustancia terrosa.

2.2 Agentes destructores abióticos.

Son aquellas causas de alteración de la madera de origen no vivo, y comprenden desde los agentes atmosféricos (radiación solar, humedad atmosférica, acción corrosiva de la lluvia y el viento, temperatura, etc.), mecánicos y químicos, hasta la sorción del agua y el fuego.

2.2.1 Agentes atmosféricos.

La exposición a la intemperie de los elementos de construcción constituye un fenómeno complejo en el que intervienen numerosos factores, entre los que se encuentran no sólo los agentes atmosféricos anteriormente indicados, sino también la superposición de los mismos, su diferente intensidad, su periodicidad (diaria, estacional), etc.

La fotodegradación de la madera por la radiación solar, de cuyo espectro total sólo una pequeña parte alcanza la Tierra, no supone en piezas gruesas una pérdida apreciable de resistencia mecánica, pero sí influye, de forma decisiva, como se verá a continuación, en la degradación superficial. Durante los primeros meses de exposición, la capa superficial de la madera está sometida al ataque de los rayos ultravioletas, aunque también ejercen una acción nociva los infrarrojos e incluso los del espectro visible. En general, la degradación comienza por la lignina y, si la superficie no está sometida a la acción de la lluvia, el ataque se traduce en un oscurecimiento pronunciado, mientras que si está muy expuesta los productos de la degradación son eliminados por el agua, de manera que la celulosa blanquecina, menos sensible a las radiaciones, subsiste en la superficie que adquiere tonalidades claras. Además, las células más externas pueden recubrirse poco a poco de mohos, que necesitan para vivir de la humedad de la madera y de los productos de la fotodegradación, dando a la superficie la coloración grisácea o negruzca tan común en carpinterías de exterior mal conservadas. Este último fenómeno no ocurre, o se atenúa considerablemente, en climas muy secos o en regiones costeras en las que la atmósfera salina puede inhibir el crecimiento de microorganismos.

La fotodegradación y los citados mohos producen un debilitamiento mecánico de la sustancia leñosa superficial que, combinados con la acción del viento y de la lluvia, la destruyen. Por otra parte, los tejidos menos densos (madera de primavera) son más atacados que los compactos (madera de verano), lo que origina los típicos *dientes de peine* en la superficie de maderas colocadas en exteriores. Como dato de referencia, puede indicarse que una madera después de 100 años de plena exposición a la intemperie pierde una capa de aproximadamente 6,25 mm de espesor. Por otra parte, esta pérdida superficial, junto a la variación de volumen (merma e hinchazón) producida por los cambios de humedad, ocasionan la aparición de fendas de mayor o menor grosor, por las que penetra la humedad facilitando la acción de los hongos de pudrición en zonas interiores.

2.2.2 Agentes mecánicos.

Los daños de naturaleza mecánica están muy relacionados con la dureza de la madera y el uso que se haga de la misma; piénsese, por ejemplo, en los pavimentos y en la acción que sobre ellos ejercen los tacones de las señoras o las pequeñas chinas incrustadas por las suelas de los zapatos. En la madera tratada previamente, la penetración mínima del protector deberá ser suficiente para evitar que durante su vida de servicio queden al descubierto, por desgaste u otras razones, zonas sin impregnar.

2.2.3 Agentes químicos.

A la madera, en general, se la puede considerar como muy resistente a los agentes químicos, si bien sufre alteraciones por la acción de los ácidos fuertes, lejías alcalinas e incluso de los detergentes, lo que tiene una notoria influencia en las denominadas maderas domésticas. En edificios, la cal apagada en estado fresco puede ejercer acciones corrosivas si está mucho tiempo en contacto directo con el tejido leñoso. También producen este tipo de daños algunos tintes, debido a la hidrólisis de los hidratos de carbono, no debiéndose emplear ningún material colorante sin conocer previamente su comportamiento. Como idea general, puede decirse que la acción de los productos químicos sobre la madera se traduce normalmente en simples alteraciones de color.

Numerosas maderas son susceptibles de presentar manchas cuando se encuentran en contacto con piezas de hierro o acero si las condiciones de humedad son elevadas. Estas manchas, generalmente negras o negro-azuladas, pueden ser muy intensas, afeando sensiblemente la superficie de la madera. Se producen por una reacción química entre el hierro y los taninos o polifenoles presentes en el tejido leñoso, que dá como resultado la formación de compuestos de hierro de color oscuro, siendo mucho más frecuentes en las frondosas (roble, castaño, etc.) que en las coníferas. Con el fin de evitar estos daños, no deberán emplearse en maderas con alto contenido en taninos, sometidas periódicamente a condiciones de humedad elevadas (exteriores), clavos, tornillos, herrajes, etc. de hierro o acero, sino los fabricados en latón, bronce, aluminio u otro material no ferroso. En el caso de que las manchas se hayan ya producido, es posible eliminarlas aplicando una solución acuosa de ácido oxálico al 8% en las

zonas afectadas, previa eliminación de las posibles capas de barniz existentes. Una vez desaparecida la mancha, es preciso lavar muy bien la superficie con agua, de forma que se elimine cualquier rastro de ácido, ya que éste puede producir nuevas manchas al reaccionar con otros componentes de la madera.

Además de las producidas por el hierro y la presencia de hongos cromógenos (azulado), ya mencionadas, existen otras muchas clases de manchas, entre las que destacan, por su importancia, las originadas por el crecimiento superficial de mohos en piezas no secas o almacenadas en atmósferas muy húmedas y las originadas por cambios químicos en el contenido celular de la albura de determinadas frondosas.

2.2.4 Sorción de agua.

En la madera colocada en exteriores e incluso en interiores, la higroscopicidad reviste una gran importancia. La higroscopicidad, propiedad que tienen ciertos materiales de tomar vapor de agua de la atmósfera, es muy acusada en la madera, como ya se ha indicado en el punto 1.4 al hablar de las relaciones agua-madera. Las variaciones de humedad y, por consiguiente, la estabilidad dimensional, están determinadas, como se ha indicado, por la temperatura y la humedad relativa del aire, pero también por la radiación solar que influye muy directamente sobre la temperatura del tejido leñoso lo que origina migraciones de vapor de agua en la dirección de las zonas más frías. Por esto, la madera protegida de la radiación solar presenta una mejor estabilidad dimensional a corto plazo.

2.2.5 Fuego.

Para poder comprender el comportamiento de la madera ante el fuego es preciso aclarar previamente qué se entiende por incendio, así como definir los conceptos básicos de reacción al fuego de un material y comportamiento al fuego de un elemento constructivo.

Incendio. Es un fuego o combustión incontrolada cuya evolución y duración es consecuencia de los materiales que se encuentran en el edificio, dependiendo, por tanto, de la cantidad y naturaleza de los mismos.

Reacción al fuego de un material. Es un índice de su capacidad para favorecer el fuego. Se debería valorar considerando los siguientes criterios que tratan de reproducir los factores que intervienen en un incendio:
Combustibilidad.
Poder calorífico.
Inflamabilidad.
Propagación de la llama.
Producción de gases nocivos.

La Norma Básica de la Edificación CPI-90 (Condiciones de Protección contra Incendios en los Edificios) clasifica los materiales empleados en la construcción de edificios a efectos de su reacción ante el fuego, de acuerdo con la Norma UNE 23-727, en las siguientes clases:

M0-No combustible
Ml - Combustible pero no inflamable
M2- Inflamabilidad moderada
M3- Inflamabilidad media
M4- Inflamabilidad alta

La clase M0 indica que un material es no combustible ante la acción térmica normalizada del ensayo correspondiente. Un material de clase M1 implica que su combustión no se mantiene cuando cesa la aportación de calor de un foco exterior.

Comportamiento al fuego de un elemento constructivo. La NBE CPI-90 la define como el tiempo durante el cual dicho elemento, en el ensayos normalizado conforme a la norma UNE 23-093, es capaz de mantener las condiciones de:

Estabilidad o capacidad portante.
Ausencia de emisión de gases inflamables por la cara no expuesta.
Estanquidad al paso de las llamas o gases calientes.Resistencia térmica suficiente para impedir que se produzca en la cara no expuesta, una temperatura media, medida en los termopares dispuestos según norma, superior en 140ºC a la temperatura inicial del ensayos, o bien que, en alguno de los termopares, se supere la temperatura inicial en 180ºC.

Se dice que un elemento constructivo es estable al fuego (EF) cuando cumple la condición a). Si se exige que sea para llamas (PF) debe cumplir las condiciones a), b) y c), siendo resistente al fuego (RF) cuando cumple las cuatro condiciones.

La norma básica establece sus exigencias conforme a la siguiente escala de tiempos: 15, 30, 60, 90, 120, 180 y 240 minutos.

Definidos los conceptos anteriores debemos decir que la madera es un material combustible (su poder calorífico varía según las especies entre 4.000 y 4.500 cal/gr), cuya reacción al fuego se encuentra comprendida entre las clases M3 y M4. Sin embargo, al principio de la combustión el calor aportado a la madera se emplea en evaporar el agua de la misma, con lo que se reduce el foco calorífico en la primera fase del incendio. Por ello, raras veces es la causa de la iniciación del fuego, salvo en ocasiones excepcionales, como en almacenes de aserrín o virutas, recintos con piezas muy secas y de pequeña sección, etc. Por otra parte, la inflamabilidad de la madera, originada por el desprendimiento de hidrocarburos en su calentamiento, puede corregirse mediante el tratamiento con ignífugos, que actúan de diversas formas: unos impiden la salida de gases inflamables, rellenando al fundirse a baja temperatura los poros de la madera o formando

espumas o barreras; otros actúan directamente sobre el proceso de combustión interrumpiendo las reacciones que en él tienen lugar y, por último, los hay que forman con la madera compuestos más estables, o bien, como en el caso de los fosfatos, aumentan la cantidad de carbón y de vapores de agua, con lo que evitan el desprendimiento de gases inflamables. En definitiva, la técnica posibilita mejorar de forma considerable la reacción al fuego de la madera, quedando en muchas ocasiones reducido el problema a aspectos puramente económicos.

Si bien, como hemos indicado, la madera sin ignifugar tiene mala reacción al fuego, su resistencia es alta, posibilitando contener el incendio y mantener el pie las estructuras del edificio mientras se desaloja. En efecto, la carbonización exterior de la madera y su baja conductibilidad térmica no permiten arder a la parte interna de las vigas y piezas de grandes dimensiones (se admite que la velocidad de penetración del fuego en la madera es de 0,7 mm/min, despreciando los 3 primeros mm. de formación de carbón). Además, la pérdida de resistencia originada por la disminución de sección, al quedar la superficie carbonizada, es en parte compensada por el hecho de que la madera al ir deshidratándose por efecto del calor, aumenta de forma proporcional su resistencia a la compresión y a la flexión. Esta es la razón, avalada por numerosos incendios espectaculares ocurridos en todo el mundo, de que los bomberos confíen en las estructuras de madera más que en las de acero y hormigón armado, que se derrumban ante el fuego total e inesperadamente. Por último, es necesario indicar que los conceptos de emisión de gases inflamable por la cara no expuesta y de aislamiento térmico, juzgado con, el criterio de que la temperatura en esa misma cara no supere en 140°C la inicial, son muy favorables para la madera debido a su baja conductibilidad térmica.

3. Duración Natural

El concepto duración natural de una madera tiene una gran importancia, ya que define la calidad de su conservación para un uso definido, cuando ningún tratamiento de protección le ha sido aplicado. No obstante, es necesario aclarar algunos conceptos:

Decir que una madera tiene una mayor o menor duración natural no significa nada, si no se refiere a un determinado agente destructor.

El origen de una madera no influye de una manera decisiva sobre su duración, siendo errónea la idea que atribuye a las maderas tropicales una duración media mayor que a las maderas de las zonas templadas.

No existe ninguna relación entre dureza de una madera y la duración de la misma.

Dentro de una misma especie hay que distinguir entre albura y duramen, ya que la primera suele tener una duración muy inferior al segundo.

4. Protectores

Los protectores son sustancias químicas que utilizadas aisladamente o en combinación, están destinadas a asegurar a la madera, previa aplicación por procedimientos adecuados, una mayor resistencia a los agentes destructores. Las características o propiedades de un protector, si bien no suelen influir de manera determinante en su modo de aplicación, sí le condicionan en gran medida por razones de tipo técnico y económico. En consecuencia, para proceder a su elección hay que tener muy presente tanto el tipo de madera que se va a impregnar (especie, dimensiones, contenido de humedad, etc.) como las condiciones de su puesta en obra, procurando, en todo caso, que reúna el mayor número posible de características favorables, entre las que podemos destacar las siguientes:

Condiciones esenciales:
ser eficaz contra los agentes destructores de la madera y por tanto ser fungicida e insecticida.
Tener una acción lo más duradera posible, es decir, ser químicamente estable y resistir al envejecimiento (deslavado y evaporación).
No alterar las propiedades físicas y mecánicas de la madera
Penetrar convenientemente en la madera, al menos por el sistema de tratamiento elegido.

Otras condiciones igualmente importantes en muchas ocasiones son:
Que su aplicación no sea peligrosa.
No comunicar a la madera, si es posible, ningún tipo de toxicidad hacia el hombre o los animales (esta condición es imperativa para la madera de uso de interiores habitados, etc.)
No corromper ni convertir en no comestibles las sustancias alimenticias que pueden estar en contacto con madera tratada.
No aumentar la inflamabilidad ni la combustibilidad de la madera.
No ser corrosivo para los metales o serlo lo menos posible
Para usos en interiores, no comunicar a la madera un olor persistente
Para las maderas que vayan a utilizarse al natural o barnizadas, no cambiar su color y ser compatible con la aplicación del barniz
Para la madera que vaya a pintarse, ser compatible con la pintura, tener un precio aceptable.

Si bien la clasificación de los protectores puede hacerse atendiendo a múltiples criterios, en la actualidad está universalmente aceptada la siguiente:

Protectores hidrosolubles. Son mezclas de sales, de las que algunas tienen propiedades biocidas y otras la misión de asegurar la buena fijación de las primeras a la madera, de forma que impidan su pérdida por deslavado. Suelen llevar incorporados componentes secundarios, tales como inhibidores de la corrosión, colorantes, solubilizadores, etc. En todos ellos se

emplea como solvente el agua, pudiendo ser las reacciones de fijación e insolubilización, una vez en el interior de la madera, más o menos rápidas y complejas según las distintas formulaciones, lo que determina de forma decisiva el sistema de tratamiento a emplear. Comercialmente se presentan en polvo o en forma de pastas más o menos viscosas, con formulaciones que suelen contener tres grupos de cationes: cobre-cromo-arsénico, cobre-cromo-boro y fluor-cromo-arsénico, lo que permite asegurar, no sólo su buena fijación en el tejido leñoso por la constante presencia de cromo, sino también ampliar su eficacia sobre un mayor número de hongos e insectos xilófagos.

Este tipo de protectores, empleados sobre todo en el tratamiento de estructuras, postes, pilares, cercas, etc., presenta como principal ventaja su reducido precio, debido a que las sales que entran en su composición suelen ser baratas y a que se utiliza como solvente agua. Por otra parte, no suelen tener olor desagradable, ni antes ni después de su aplicación, y no aumentan la inflamabilidad de la madera, sino que, por el contrario, la disminuyen. Su mayor inconveniente, derivado en realidad de su ventaja más notable, consiste en que al utilizar como solvente agua, se producen hinchamientos en las maderas recién tratadas al aumentar la humedad del tejido leñoso, obligando a un prolongado secado posterior antes de su puesta en obra, durante el cual pueden aparecer, de no tomarse las debidas precauciones, fendas, alabeos y otros defectos no deseables.

Protectores de síntesis en disolvente orgánico. Presentan formulaciones más o menos complejas, en las que existen siempre: *materias activas*, generalmente productos de síntesis, un solvente, que constituye el vehículo de las anteriores y suele ser una fracción de la destilación del petróleo y *coadyuvantes,* entre los que se pueden mencionar los que tratan de asegurar la estabilidad del producto y la fijación de las materias activas en la madera tratada. Las materias activas que entran en la formulación de este tipo de protectores suelen encontrarse entre las más eficaces y estables que ofrece la química moderna, presentando algunas de ellas buenas cualidades fungicidas y otras una acción específica contra los insectos. Los solventes se seleccionan en función de su buena afinidad para la madera (deben penetrar rápida y profundamente en ella), de su capacidad de solubilizar los principios activos que tienen que introducir en el tejido leñoso y de su facultad de volatilizarse con la suficiente rapidez, para dejar lo antes posible las piezas tratadas en condiciones de empleo y, al mismo tiempo, con la suficiente lentitud, para no arrastrar hacia el exterior de las materias activas que previamente han introducido en profundidad.

Los protectores orgánicos deben aplicarse siempre a madera seca, en la que penetran fácilmente sin producir hinchamientos, ni variaciones en su color natural. Son compatibles con cualquier tipo de acabado y no corroen los metales, ni alteran, una vez evaporado el disolvente, los plásticos. Por todo ello, suelen ser adecuados para tratar todo tipo de maderas que no estén en contacto directo con el suelo, siendo su mayor inconveniente su precio relativamente elevado.

Dentro de este grupo se incluye los llamados protectores decorativos que además de las materias activas y coadyuvantes antes citados contienen resinas sintéticas y pigmentos que permiten proteger la madera de la fotodegradación y darla el color deseado. Al no formar una película continua, al contrario de los barnices y pinturas, permiten el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el tejido leñoso, lo que les hace muy aconsejables en el acabado de carpinterías y estructuras colocadas en exteriores. El tratamiento con estos protectores, que se realiza a brocha, debe ir precedido de una impregnación en profundidad con un protector también orgánico pero sin pigmentar, que permitirá obtener una mayor penetración y, por consiguiente, un grado de protección mejor contra los agentes bióticos.

Creosotas. Obtenidas por destilación de la hulla, confieren a la madera una protección de muy calidad, ya que tienen una acción fungicida e insecticida importante, propiedades hidrófugas notables y no son corrosivas para los metales.

Presentan inconvenientes para muchas utilizaciones debido a su color negro, que se transforma con el tiempo en gris verdoso, su fuerte olor, su incompatibilidad para encolados y acabados posteriores, así como, por su tendencia a dejar la superficie de la madera grasienta y con posibilidades de manchar. Todo ello origina que no sean apropiados para tratar maderas de interiores, ni aquellas a utilizar en construcciones con las que el hombre o los animales deban estar directamente en contacto.

Su empleo óptimo será en maderas a instalar en exteriores en contacto directo con el suelo, tales como traviesas, postes, estacas y similares. En todo caso, las piezas a tratar deberán encontrarse secas, pues de lo contrario, además de alcanzarse penetraciones y absorciones inadecuadas, la creosota absorbida impedirá en gran medida su correcto secado posterior.

Protectores de síntesis hidrodispersables. Su formulación comprende igual que los protectores de síntesis en disolvente orgánico de principios activos funguicidas e insecticidad, un solvente orgánico y coadyuvantes, a los que se añade un emulgente .

Son por tanto, productos en solución orgánica concebidos para ser emulsionados en agua, el disolvente menos caro que puede existir.

Este tipo de protectores se empezó a desarrollar a partir de la crisis del petróleo de 1981, con el fin de sustituir como vehículo de los principios activos, los solventes derivados del petróleo por agua. Es demasiado pronto para sacar conclusiones sobre sus prestaciones,

teniendo las ventajas e inconvenientes de utilizar definitivas materias activas muy eficaces y, al mismo tiempo, producir el hinchamiento de las maderas recién tratada

5. Sistemas de tratamiento

Sistemas de tratamiento son los métodos empleados para introducir los protectores en la madera. De forma esquemática se puede decir que existen tres modos de penetración de los protectores: *desplazamiento de la savia* por la solución de tratamiento en la madera recién apeada, *difusión* a través de las paredes celulares de una solución concentrada aplicada a la superficie de la madera verde e *impregnación,* por capilaridad o presión, de las células de la madera seca (humedad inferior al punto de saturación de la fibra) y posterior absorción del protector por la pared celular. Este tercer método es el generalmente empleado en la madera de construcción, y la noción de permeabilidad, es decir, la aptitud de una madera seca a dejarse penetrar por un protector, está referida a él. La permeabilidad de una madera varía según la especia, dependiendo de su estructura anatómica, pero no está ligada ni a la densidad ni a la dureza. Este concepto de permeabilidad es de gran interés, ya que de él depende el sistema de tratamiento que es necesario elegir, así como la penetración conseguida y, por tanto, el grado de protección alcanzado.

El *grado de protección* que es necesario dar a una madera para evitar los daños que le puedan producir los agentes destructores, depende de la especie y de la utilización que se vaya a hacer de la misma, estando definido por dos conceptos básicos: la penetración y la retención. La primera es la profundidad alcanzada por el protector en la madera tratada y la segunda la cantidad de protector contenido por unidad de volumen realmente impregnado, si bien, en tratamientos de superficie, también se puede llamar retención a la cantidad de protector por unidad de superficie tratada.

Para comprender los mecanismos por los cuales un protector puede introducirse en la madera, es necesario conocer la estructura íntima de ésta, que, como ya hemos indicado, a nivel anatómico presente diferencia notables según las distintas especies.

Por otra parte, durante el crecimiento del árbol los anillos más antiguos dejan de cumplir su misión de servir de circuito a la savia y esta evolución se acompaña de modificaciones que les impermeabilizan e impregnan naturalmente de taninos, resinas, etc. Éste explica que el duramen sea frecuentemente mucho más difícil de impregnar que la albura. Por otra parte, en el curso de la desecación de una madera también pueden producirse modificaciones, como bloqueo de las punteaduras areoladas (ocurre en la picea), lo que dificulta enormemente la circulación de líquidos que, por el contrario, era fácil cuando la madera formaba parte del árbol vivo.

Los sistemas de tratamiento pueden tener el carácter de preventivos o curativos. Los primeros tratan de dar a la madera un grado de protección externa que evite la acción de los agentes destructores durante el período de tiempo que esté puesta en servicio y los segundos tienen por objeto interrumpir un proceso de destrucción ya comenzado, eliminando por medio apropiados los agentes destructores y dejando a la madera protegida contra cualquier nuevo intento de arranque.

5.1. Tratamientos preventivos

Los tratamientos más utilizados antes de la puesta en obra de la madera son los siguientes:

Tratamiento de superficie. Procedimiento por el que se aplica un protector sobre la superficie de la madera seca mediante brocha, pulverización o inmersión breve, entendiendo como tal, el sistema consistente en sumergir la madera en un baño, que contenga el protector, durante un tiempo comprendido entre 10 segundos y 10 minutos. Con estos métodos se emplean casi exclusivamente protectores de tipo orgánico que tienen una mayor penetrabilidad que los hidrosolubles y las creosotas.

Inmersión prolongada. Tratamiento consistente en sumergir la madera seca en la solución de tratamiento por un período de tiempo superior a 10 minutos. Generalmente suele mantenerse sumergida la madera una o más horas, dependiendo de la especie, dimensiones y humedad de la pieza a tratar y del tipo de protector utilizado, generalmente hidrosoluble o creosota.

Inmersión caliente-fría. Tratamiento en el que la madera seca se calienta en un depósito de inmersión que contenga la solución de tratamiento (a veces sólo el disolvente o diluyente), llevándose a continuación rápidamente a otro depósito de inmersión, que contenga la solución de tratamiento fría, en la que se mantendrá hasta conseguir la absorción deseada. Existe la alternativa de sumergir la madera en la solución de tratamiento que es calentada y, pasando cierto tiempo, dejada enfriar; la madera absorbe el protector mientras se enfría. Esta última alternativa exige sólo un depósito de inmersión.

Con este sistema se aplican protectores de tipo hidrosoluble y creosotas.

Difusión. Tratamiento en el que un protector de tipo hidrosoluble se aplica a la superficie de la madera verde en forma de pasta o solución concentrada, difundiéndose a través de la madera húmeda debido al gradiente de concentración.
El procedimiento más corriente suele consistir en una inmersión previa más o menos prolongada, según que la concentración de la solución de tratamiento sea menor o mayor, seguida de una difusión de varios días,

para lo cual se apilará la madera al abrigo de la evaporación o del deslavado.

Vacío-vacío. Tratamiento que consta de las siguientes operaciones: vacío previo para extraer parte del aire de la madera, inyección del protector volviendo a la presión atmosférica o bien en algunos casos aplicando presiones reducidas (dos atmósferas como máximo) y vacío final con objeto de regular la retención del protector, que es siempre orgánico. Este procedimiento se adapta bien a las necesidades de la madera de construcción, siendo junto a la inmersión breve los más utilizados.

Tratamiento a presión en autoclave. Consiste en hacer penetrar el protector en la madera de forma forzada, aplicando presión en un cilindro cerrado o autoclave. Estos tratamientos se aplican a maderas secas y permiten alcanzar una penetración mayor, por lo que son los más apropiados cuando existe grave riesgo de destrucción. Las diferentes modalidades o variantes de este método, adecuadas a cada caso particular, responde fundamentalmente a los tipos de célula llena y célula vacía. El primero, conocido también como tratamiento Bethell, consta de un vacío inicial que permite extraer parte del aire de la madera, de una posterior inyección del protector a presión y, por último, de un vacío final que regula moderadamente la retención, siendo el más adecuado cuando se trata de conseguir retenciones máximas. El segundo, en cambio, se caracteriza porque no se realiza la operación del vacío inicial, que puede ser simplemente eliminada (tratamiento Lowry), o bien sustituida por otra consistente en someter a la madera a una presión inicial antes de ponerla en contacto con el protector (tratamiento Ruping). Los tratamientos de célula vacía permiten, consiguiendo la retención necesaria, evitar exudaciones posteriores en la madera, que no aumente excesivamente el peso de ésta y economizar protector.

En muchas ocasiones, según la utilización que se vaya a hacer de los mismos, es necesario proceder al tratamiento preventivo de los productos derivados de la madera. En el caso concreto de los tableros los métodos de protección más usuales son los siguientes:

Tableros contrachapados. Los tratamientos pueden ejecutarse en cualquiera de las fases de fabricación, teniendo en cuenta la especie de madera de las diferentes chapas, el espesor de éstas, la naturaleza de las colas empleadas y el destino que se va a dar a los tableros. Así, un protector puede aplicarse a la chapa antes de encolarla, a la cola desde donde se difundirá a la madera, o bien, en determinados casos, a los tableros terminados.

Tableros de partículas. En este tipo de tableros elprotector se aplica en general durante el proceso de fabricación, mediante el tratamiento previo a las partículas o incorporándole a la mezcla encolante.

Tableros de fibras. Por las especiales características del proceso de fabricación, el tratamiento suele aplicarse a los tableros terminados.

5.2. Tratamientos curativos de la madera puesta en obra.

Haciendo sólo referencia a los agentes bióticos, los tratamientos curativos pueden agruparse en tres tipos, según la categoría del xilófago presente: hongo, insecto de ciclo larvario e insecto social.

Tratamiento contra hongos. Al ser la humedad una condición indispensable para el desarrollo de los hongos, la primera operación del tratamiento consiste en sanear la construcción, suprimiendo todas las causas de humedad anormales (fugas, infiltraciones, condensaciones, etc.) y asegurando una ventilación permanente de la madera. Hay que tener en cuenta que algunas especies de hongos xilófagos son capaces de obtener el agua que necesitan de lugares relativamente alejados, por lo que la eliminación de las fuentes de humedad no debe circunscribirse únicamente a las zonas afectadas por la pudrición, sino extenderse a todo el edificio. Una vez saneado éste, la segunda medida a tomar, igualmente importante, es la desinfección del local, eliminando todos los tejidos de hongos presentes (cuerpos de fructificación, masas miceliares, etc.) y los restos de madera atacada, que deberán quemarse lo más cerca posible del lugar en que han sido retirado para evitar nuevas infecciones. Especial cuidado debe tenerse en destruir, bien mediante el fuego proporcionado por una lámpara de soldar o por la aplicación masiva de fungicidas, los residuos de hongos adheridos a la mampostería, pues pueden constituir un foco de contaminación que posibilite la reanudación del ataque si por cualquier causa fortuita aumentase la humedad de la madera.

Después del saneamiento y desinfección del edificio, se procederá a evaluar la intensidad de los daños y, en consecuencia, a determinar qué partes deben mantenerse y cuáles debe sustituirse o consolidarse. La elección del tratamiento químico dependerá de las circunstancias propias de cada caso, siendo lo más frecuente aplicar el protector por pincelado o pulverización en toda la superficie de la estructura de madera, excepto en aquellas zonas en las que por apreciarse una incipiente pudrición o presentar un riesgo mayor, se inyectará en profundidad mediante taladros.

Tratamiento contra insectos de ciclo larvario. Es necesario destruir las larvas en sus galerías, por lo que el problema consiste en obtener una penetración suficiente del protector en función de la sección de las piezas a tratar, de la permeabilidad de la madera atacada y de la profundidad de ataque.

La técnica de tratamiento a seguir depende de cada

situación particular, ya que son múltiples los factores a tener en cuenta para conseguir una eficaz eliminación de xilófagos en la madera. A título de ejemplo, se describirá el tratamiento que con más frecuencia se aplica a estructuras atacadas poro carcoma grande (*Hylotrupes bajulus L.)*. En este caso, ante la imposibilidad de determinar con exactitud en cada una de las piezas la profundidad de los daños, el método de tratamiento se plantea en función de su grosor. Así, para piezas de sección pequeña, es suficiente un tratamiento químico superficial por pincelado o pulverización, mientras que a partir de secciones superiores a los 10 cm., es necesario completar el citado tratamiento con la inyección en profundidad del protector mediante taladros practicados convenientemente.

En los casos en que el ataque se haya desarrollado con intensidad en la periferia de la pieza, es frecuente que, bajo una fina película externa, la madera esté prácticamente reducida a serrín que rellena una red de galerías de paredes extremadamente frágiles. Esta capa inerte puede retener una cantidad considerable de protector, que se desperdicia casi totalmente perjudicando la eficacia del tratamiento. Por tanto, es importante eliminarla, si es posible, mediante una operación de desbastado que se realiza con un cepillo de púas. El desbastado presenta la ventaja de poner a la vista las partes sanas de la estructura, facilitando la evaluación precisa de los daños y la importancia de las consolidaciones necesarias. Por el contrario, a veces supone un grave atentado al aspecto estético de la madera vista, debiendo evitarse. Si esto sucede, el tratamiento superficial exige un gasto de protector muy superior al normal. Cuando han de conservarse carpinterías de valor, gravemente atacadas, se puede proceder no sólo a su tratamiento químico, sino también a su consolidación por medio de inyecciones con resina polimerizables.

Tratamiento contra termitas. Al proceder estos insectos sociales de un nido subterráneo, no basta, como en el caso de los de ciclo larvario, con aplicar un tratamiento químico a la madera afectada, siendo necesario construir también una barrera insecticida que impida la invasión del edificio por nuevos individuos. En síntesis, el tratamiento consistirá en eliminar las causas de humedad que favorecen el desarrollo de las termitas, así como en destruir las galerías, tanto visibles como ocultas, que utilizan para llegar a la madera. A continuación se procederá a crear con insecticidas muy persistentes una barrera continua, lo que exigirá no sólo tratar el suelo por el exterior e interior de las fundaciones, hasta una profundidad de aproximadamente 50 cm. y lo más cerca posible de las mismas, sino también la base de los muros. Finalmente, se tratará químicamente toda la estructura de madera de la forma indicada para los insectos de ciclo larvario, teniendo especial cuidado con las zonas de empotramiento de las vigas, y se realizarán las consolidaciones oportunas mediante inyección con resinas polimerizables, o cualquier otra técnica.

Si, como ocurre normalmente en la práctica, el edificio en rehabilitación invadido de termitas está adosado a otras construcciones, es inútil plantear su tratamiento de forma aislada, puesto que los xilófagos pueden seguir accediendo a la madera de los pisos superiores utilizando los muros de los inmuebles contiguos. En este caso, el tratamiento debe plantearse de forma conjunta en un programa que englobe como mínimo los edificios de una misma manzana.

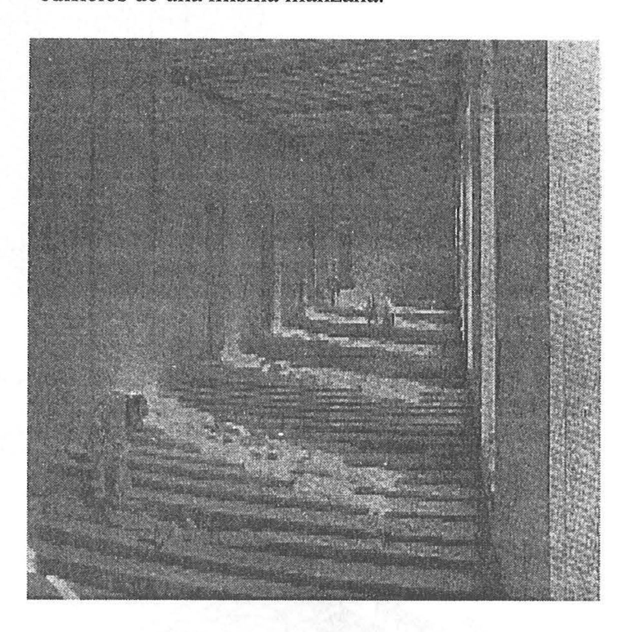


FIGURA 6: Forjado en fase de restauración

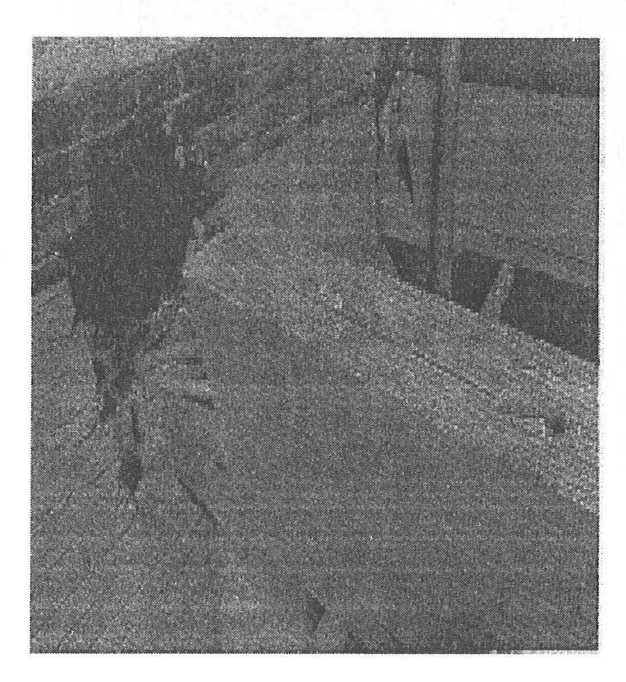


FIGURA7: Introducción de varillas una vez eliminada la madera atacada y efectuados los taladros.

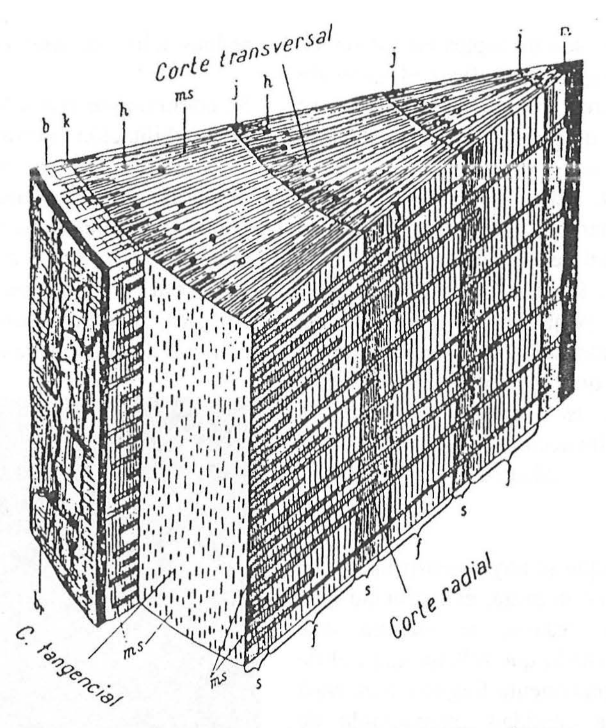


Figura 1. — Cuña cortada de un tronco de pino silvestre de cuatro años. (Según E. Strasburger: *b* liber, *br* corteza, *f* madera de primavera, *h* canal resinífero, *j* límite del anillo de crecimiento, *k* cambium, *m* médula, *ms* radio leñoso, *s* madera de otoño.)

Face transversale
Bois final
Bois initial
Cambium
Rayon
Face radiale
Face tangentielle
Tracheide
Parenchyme

CONIFERA

Face transversale
Bois final
Bois initial
Cambium
Rayon
Vaisseau
Fibre
Face radiale
Parenchyme
Face tangentielle

FRONDOSA

MÉTODOS DE DATACIÓN DE BIENES CULTURALES: DENDROCRONOLOGÍA Y CARBONO-14.

Eduardo RODRíGUEZ TROBAJO.
Laboratorio de Dendrodatación.
Centro de Investigación Forestal. INIA.

Se trata de dos métodos habituales de datación en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural. Su aplicabilidad presenta, no obstante, notables diferencias en cuanto al tipo de material, metodología y precisión de los resultados.

La dendrodatación se basa en un fenómeno biológico específico de la madera y precisará, en general, un cierto número de muestras con unas características muy particulares. Como contrapartida, la precisión del resultado es óptima pues, con independencia de la antigüedad, se llega a determinar la datación sin ningún margen de error.

La radiodatación es un método fisicoquímico y, por tanto, su fundamento y metodología son radicalmente distintos. Se aplica a cualquier material que contenga carbono -no sólo a la madera- y las cantidades precisas para el análisis son, por lo general, inferiores a las utilizadas en dendrodatación. Por el contrario, la precisión del carbono-14 es relativa y le afecta un error experimental que, junto a otros factores como la calibración, introducen siempre un cierto grado de imprecisión.

En consecuencia, la elección del método estará determinada por dos factores: las características específicas del material y la precisión requerida por el estudio en curso. No obstante, hay que resaltar que entre ambos métodos existe una clara complementaridad, tal como se pone de manifiesto en el presente texto.

I. LA DATACION DENDROCRONOLÓGICA.

1.1. Fundamentos del método.

La dendrocronología centra su estudio en las secuencias de anillos que son generados por el árbol durante su crecimiento. Se trata de un fenómeno complejo en el que intervienen factores internos (genéticos) y externos (clima, suelo, enfermedades, competencia etc.), que interrelacionan y producen una respuesta que es variable en cada árbol. Entre todos estos factores involucrados, nuestro interés se orienta hacia los factores climáticos por su capacidad de provocar respuestas similares en árboles distintos, e incluso distantes entre sí, tanto en el espacio como en el tiempo. Esta propiedad constituirá el fundamento de la datacióndendrocronológica.

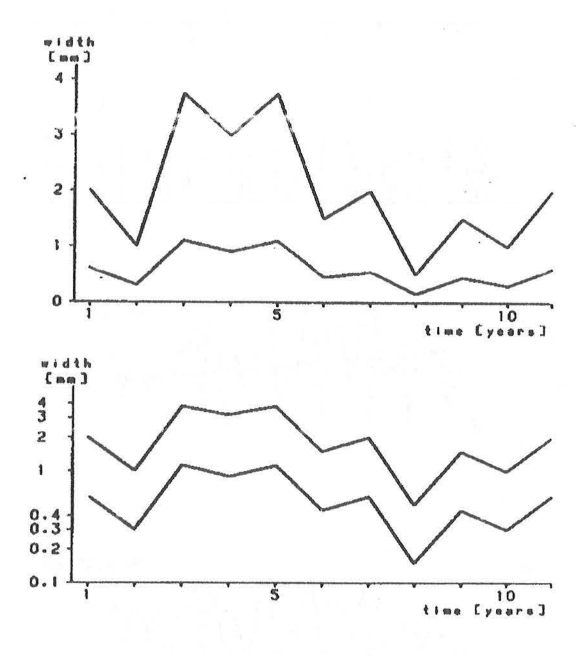


FIGURA 1 ; Diferentes opciones de representación de las curvas dendrocronológicas: arriba, con escala lineal; abajo, las mismas curvas con escala logarítmica.

Una curva dendrocronológica es una representación gráfica de las secuencias de anillos de un árbol en la que se disponen los años en abscisas y los espesores de los anillos en ordenadas. Es práctica habitual utilizar el logaritmo del espesor con el fin de mejorar la comparación entre curvas diferentes (figura 1). Existen otros procedimientos gráficos, como, por ejemplo, los skeleton plots que es un método clásico en el que se registran sólo los anillos más estrechos por su mayor significación, lo que es plenamente válido en regiones de climas subdesérticos (figura 2). Así mismo, es posible optar por variables alternativas al espesor de anillo, entre las que destacamos la densidad máxima de cada anillo por sus buenos resultados en la datación, pero que implican una mayor complejidad en el proceso de medición.

Una limitación importante del método es que no puede ser aplicado a cualquier especie arbórea. En efecto, la definición de los anillos ha de ser inequívoca como sucede en coníferas y frondosas de anillo poroso, en todas las cuales el límite anular es nítido; pero esto no sucede siempre así en muchas frondosas de anillo difuso. Por otra parte, la propia distribución geográfica de especies condiciona radicalmente el estudio. Así, mientras que en el centro y oeste de Europa las especies más estudiadas han sido el roble y el haya, y también el pino y abeto en sus montañas, en el norte y este de Eu ropa predominan los estudios de picea y pino, junto al alerce, este último preferentemente en los Alpes. Por el contrario, en la Europa mediterranea el roble tiene una distribución claramente limitada y, logicamente, proliferan los estudios sobre los pinos, abetos, enebros y sabinas.

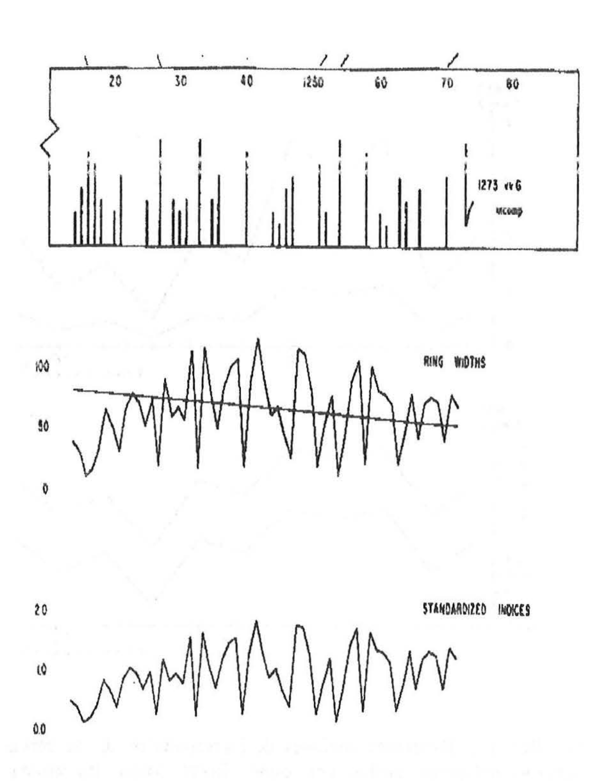


FIGURA 2 : ejemplo de curva dendrocronológica y su correspondiente skeleton plot en la parte superior de la figura

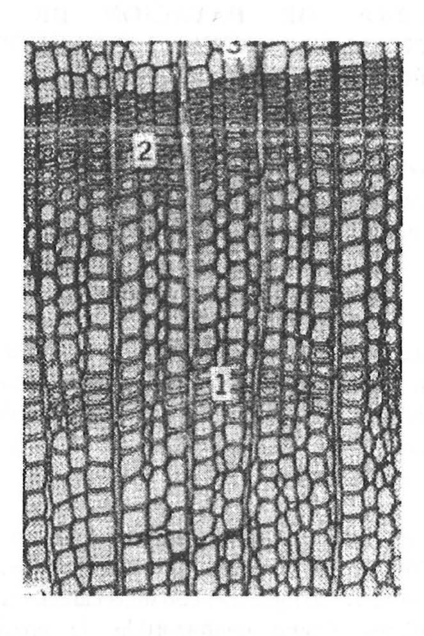


FIGURA 3: Anomalía de "doble anillo" en una conífera: madera final falsa (1) y verdadera (2).

La datación dendrocronológica se basa, tal como se indicaba al principio, en un estudio de la señal climática y su eficacia dependerá, por tanto, de la intensidad y calidad de dicha señal. Cuando alguna de los variables climáticas (pluviosidad, temperatura, etc.) se mantiene próxima al límite o umbral inferior, que es compatible con la actividad vegetativa del árbol, se producirán curvas bien contrastadas propias de una señal climática intensa. Este tipo de respuesta se denomina sensible. Por el contrario, si no existen factores climáticos que limiten el crecimiento, la señal climática será superada facilmente por otros efectos no climáticos, y la respuesta del árbol será calificada como complaciente. En este caso, la datación dendrocronológica se torna dificil, o incluso imposible, a medida que el exceso de ruido llegue a suprimir la señal útil. Finalmente, en el caso opuesto de una gran limitación ejercida por el medio se desencadenará una respuesta hiper-sensible en el árbol y se manifestarán anomalías desfavorables, como anillos ausentes, dobles, etc. (figura 3), lo que puede llevar a invalidar las secuencias para su datación.

1.2. El procedimiento de datación.

La operación básica del método se denomina sincronización (crossdating) de curvas dendrocronológicas: de todas las posiciones relativas de comparación de dos curvas entre sí, solamente en una posición la similitud entre las curvas se hace significativa (figura 4). Es evidente que este grado de similitud debe estar respaldado por algún tipo de prueba objetiva que cuantifique la probabilidad de que no se trata de una similitud por simple azar. A tal efecto, se utilizan distintos test, entre los que citaremos, por su utilización más frecuente, el test W del coeficiente de coincidencia y el test de la t, basado en el coeficiente de correlación. Es importante destacar que la eficacia de ambas pruebas depende estrechamente del número de años comparados entre ambas curvas dendrocronológicas, (figura 5).

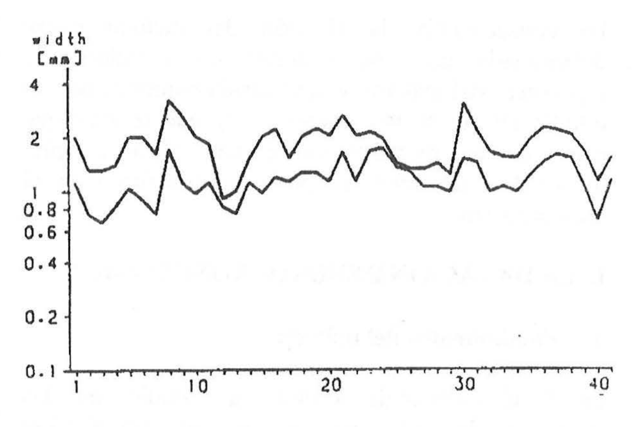


FIGURA 4: La sincronización o crossdating de estas curvas se basa en el grado de similitud existente entre ellas, que no puede ser explicada por simple azar.

Cuando se dispone de un conjunto de curvas sincronizadas entre sí, se procede a la elaboración de una cronología -puede tratarse de una media simple-, que nos permitirá mejorar la señal climática al minimizar los efectos individuales de cada serie (figura 6). Por este motivo, el agrupamiento de un buen número de muestras afines es un factor clave para construir una

cronología local porque, de este modo, las posibilidades de datación serán muy superiores a las de una muestra aislada. Como simple dato orientativo, podemos fijar un mínimo empírico de 10 muestras por muestreo.

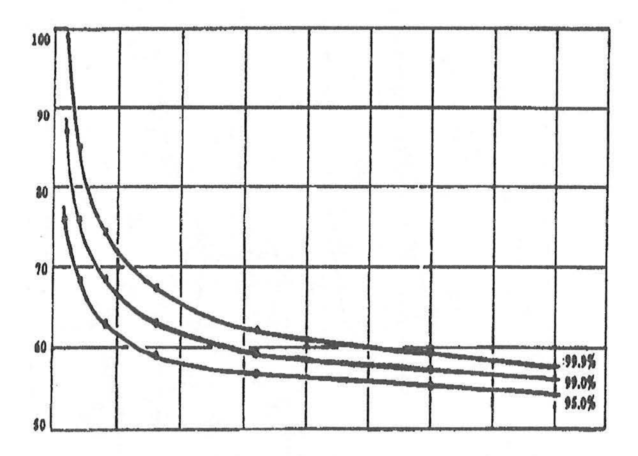


FIGURA 5: En el test W se calcula el coeficiente de confianza (95, 99 y 99,9%), a partir del coeficiente de coincidencia (ordenadas) y el número de años (abscisas).

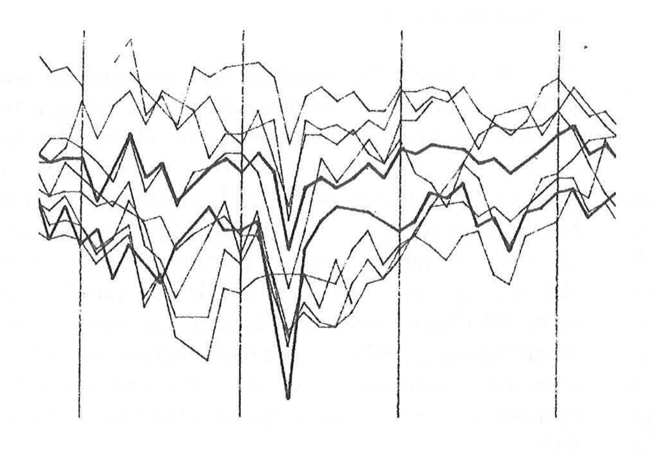


FIGURA 6: Un conjunto de series individuales (trazo fino) es mejorado por su curva media (trazo grueso superior) cuando se comparan con la curva de referencia (trazo grueso inferior).

En cualquier caso, una cronología de este tipo reflejará ante todo el microclima y otros factores de carácter local, por lo que es difícil conocer a priori el alcance geográfico que va a tener una serie dendrocronológica. Se plantea así la cuestión fundamental de la interconexión de cronologías de una misma especie en sus diferentes localizaciones, mediante el desarrollo de una red de cronologías de referencia a diferentes niveles, desde un ámbito local al regional. La puesta en marcha de este proceso conducirá, paralelamente, a la construcción de cronologías más largas mediante el solapamiento repetido de nuevas series con creciente antigüedad, tal como se explica en la figura 7. En la práctica este procedimiento estará condicionado por diversos factores, como la fiabilidad del solapamiento, la disponibilidad de material, etc.; factores todos ellos que determinan que el proceso sea lento y laborioso.

por último, hay que subrayar que el comportamiento ecofisiológico puede diferir mucho de una especie a otra, aunque se encuentren bajo unas mismas condiciones climáticas. Por este motivo, las cronologías son válidas, a lo sumo, para especie afines como es el caso de las distintas especies del género Pinus, o las dos especies de roble, el albar y el pedunculado. También se ha comprobado, bajo unas condiciones muy particulares, la heteroconexión entre el roble y el haya.

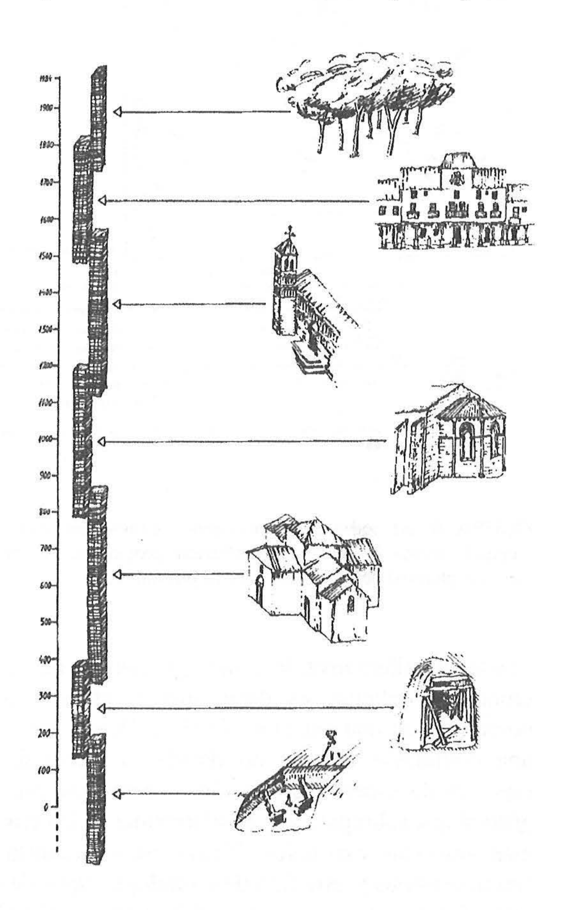


FIGURA 7: El procedimiento para alargar una cronología de árboles vivos hacia el pasado consiste en solapar cronologías parciales procedentes de edificios, excavaciones, yacimientos naturales, etc.

El proceso descrito tiene como finalidad la elaboración de una cronología absoluta o datada, cuando la serie en estudio ha podido ser enlazada, de manera directa o indirecta, con el momento actual. En gran parte de Europa, se han desarrollado en las últimas décadas gran número de cronologías de roble (Quercus robur y Q. petraea), lo que ha posibilitado su conexión en un gran grupo que alcanza 7.272 años de antigüedad. El material utilizado ha procedido de edificios, yacimientos arqueológicos, sedimentos fluviales, turberas,etc.. Asimismo en el SE de USA se dispone de una cronología absoluta de 8.685 años para el Pinus longaeva. Por el contrario, en áreas geográficas específicas como la

mediterranea, donde la longevidad de los árboles es corta y el material más escaso, no se ha logrado superar con ninguna especie los 2.000 años.

En España la madera más idonea para construir series de referencia largas y generales son las distintas especies de pino, al ser el material más utilizado en construcción. Actualmente, se dispone de cronologías que superan los 1.000 años (figura 8)

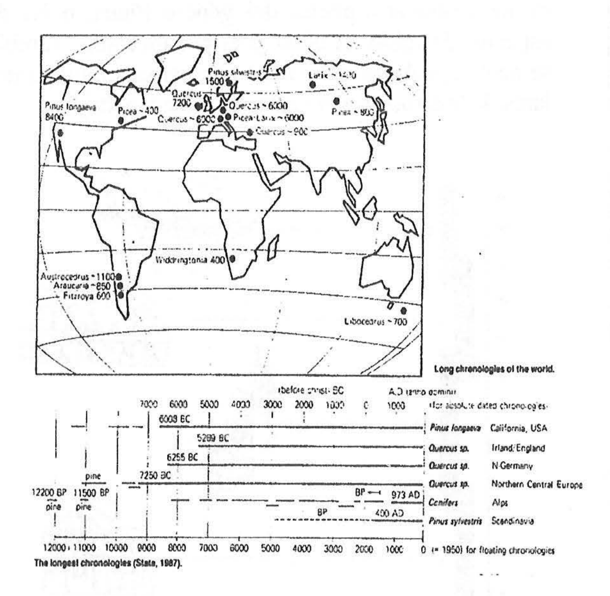


FIGURA 8: Se indican las principales cronologías con mayor longitud: resalta la desigual distribución geográfica, así como la menor extensión de las cronologías del pino silvestre

Existe otra alternativa, la cronología flotante que es una cronología relativa, es decir, una escala dendrocronométrica sin una datación absoluta. Puede tratarse de una cronología todavía no datada, o elaborada con especies de escasa distribución, o bien con una antigüedad que sobrepasa a la edad máxima de las cronologías absolutas existentes. Todas estas circunstancias son transitorias y este tipo de cronología, lejos de estar invalidadas, poseen un indudable valor en el análisis arqueológico (figura 9).

1.3. Las condiciones de aplicación.

Hay que indicar que el resultado de una dendrodatación se refiere estrictamente al último anillo (más moderno) del conjunto de muestras, si bien se producen distintas circunstancias que implican diferentes grados de precisión en la datación (figura 10):

Tipo A: Cuando alguna(s) muestra(s) tiene(n) restos de corteza se puede determinar el año en que el árbol fue cortado. Un caso equivalente es cuando no hay restos de la corteza pero se comprueba que se trata de una gema del tronco. El resultado puede afinarse incluso más al comprobar si el último anillo está completo (otoño - invierno) o incompleto (primavera - verano).

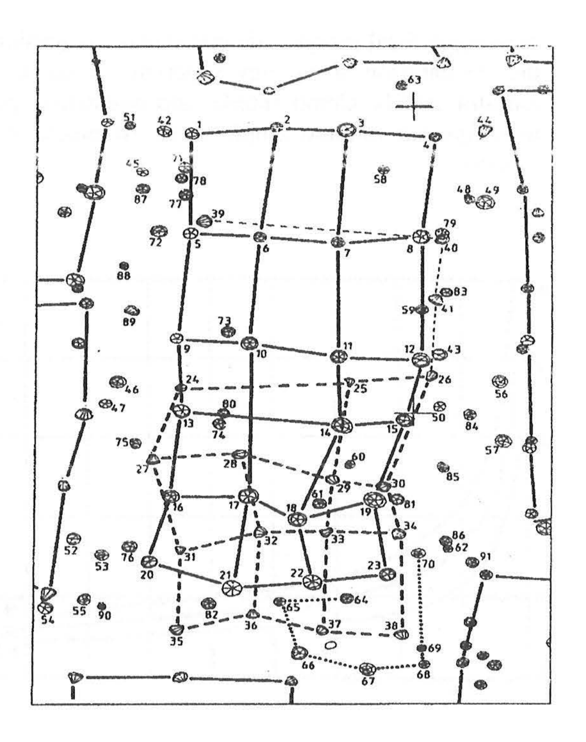


FIGURA 9: Esquema de los postes de cimentación de una cabaña en un asentamiento del Bronce Tardío a orillas del lago Neuchatel (Suiza), mostrando la cronología relativa de su construcción. La línea continua indica la construcción original, a los 13 se hacen algunas reparaciones (linea de guiones), a los 16 se añade una nueva construcción (linea de puntos). Con posterioridad, se ha podido dendrodatar absolutamente el conjunto, resultando la fecha de 1008 AC para la fase original.

Tipo B: Cuando las muestras son incompletas por haber perdido algunos de los anillos más externos, pero se trata de una especie que tiene duramen bien definido, como sucede en los robles y castaños, es posible hacer un datación muy aproximada si la muestra conserva el borde albura/duramen. Esto es posible porque se puede conocer aproximadamente el número de años de la albura completa, y éste valor puede ser sumado a la fecha del último anillo del duramen. Los valores más frecuentes en el roble europeo oscilan entre 20 y 34 ±7 años. En consecuencia, este tipo de datación aunque rigurosa presentará una pequeña imprecisión en la fecha .

Tipo C: Es el caso general de muestras incompletas: cuando no hay borde de duramen en las especies antedichas, o cuando la especie no tienen duramen definido. La datación se limitará por ello a fijar una fecha post quem, es decir, una fecha limite anterior a la tala del árbol, cuyo verdadero valor es desconocido. No obstante, se podrá hacer alguna estimación complementaria sobre el número de anillos (= años) perdidos a partir de las características del labrado y despiece del material.

De todo lo expuesto se deduce que el resultado será siempre una datación post quem. Es obvio que la dendrodatación no puede proporcionar el año de puesta en obra de un maderamen: esto será competencia de la interpretación arqueológica.

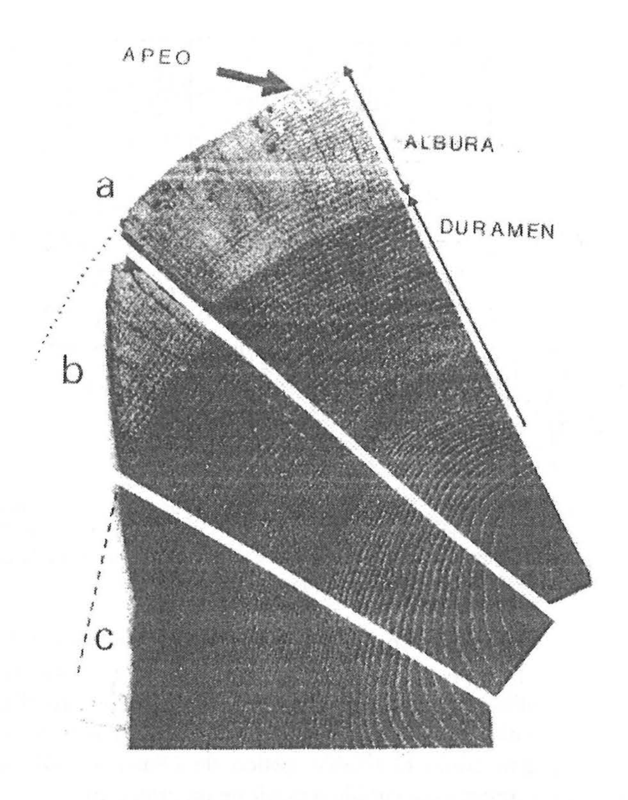


FIGURA 10.: La datación en el roble.

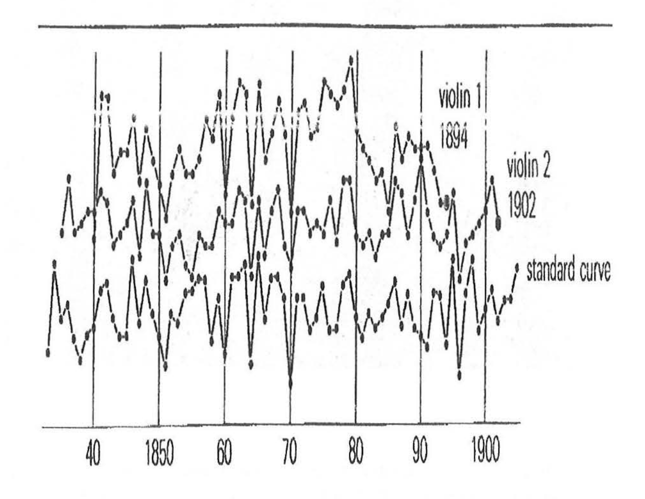


FIGURA 11: La datación de dos violines, en principio atribuidos a Stradivarius, resultó ser: post quem 1894 y 1902, por lo que no podían ser auténticos ya que Stradivarius vivió en el siglo XVIII.

Consideremos brevemente la operación más peculiar de la dendrodatación : la interdatación. Cuando se estudia un yacimiento arqueológico o un edificio y se detectan diferentes etapas o fases, el desfase cronológico entre ellas puede ser conocido con precisión; y lo mísmo puede lograrse con edificios/yacimientos distintos, más o menos distantes entre sí. Esta capacidad viene dada por las propias series en juego que actuan como cronologías de referencia mutua, es decir se interdatan entre sí, con independencia de que se conozca o no la datación absoluta de ambas. Otra ventaja de la interdatación se pone de manifiesto cuando datamos por carbono-14 una muestra de madera y evitamos la acumulación de los errores que se producirían si se radiodatasen cada una de las muestras del conjunto. Esta técnica de datación relativa, que no es posible en los métodos de datación fisicoquímicos (Carbono14, Termoluminiscencia, etc), ha proporcionado un sólido apoyo empírico al análisis arqueológico.

Finalmente, debemos valorar dos fenomenos que pueden incidir sobre la fiabilidad de la dendrodatación: la reutilización y la sustitución del material. Debemos partir del supuesto de que ambas operaciones suelen afectar a porciones menores del conjunto y que pueden ser detectadas, en la mayoría de los casos, mediante un examen minucioso de la estructura. No obstante, la mejor garantia será realizar un estudio dendrocronológico completo del conjunto, y no sobre un número escaso y disperso de muestras. En cualquier caso, es un hecho bien contrastado que la dendrodatación puede ser aplicada con éxito en la expertización y revisión de la autenticidad de las obras de arte (figura 11).

1.4. Algunos estudios realizados en España.

En el Laboratorio de Dendrodatación del Centro de Investigación del INIA se han realizado diversos estudios de datación de maderas medievales. Así podemos mencionar los trabajos sobre carpintería hispanomusulmana realizados en el conjunto de la Alhambra, datandose construcciones de época nazarí, como la Torre de Comares (1350) o el Cuarto Dorado (1369), y las restauraciones cristianas del Palacio del Partal (1533) y Generalife (1675). El uso de especies muy distintas ha condicionado la aplicación de la dendrocronología (figura 12) y, por otra parte, una alta frecuencia de anomalías de crecimiento en los pinos xerófilos propios de la región, ha dificultado la dendrodatación (figura 13).

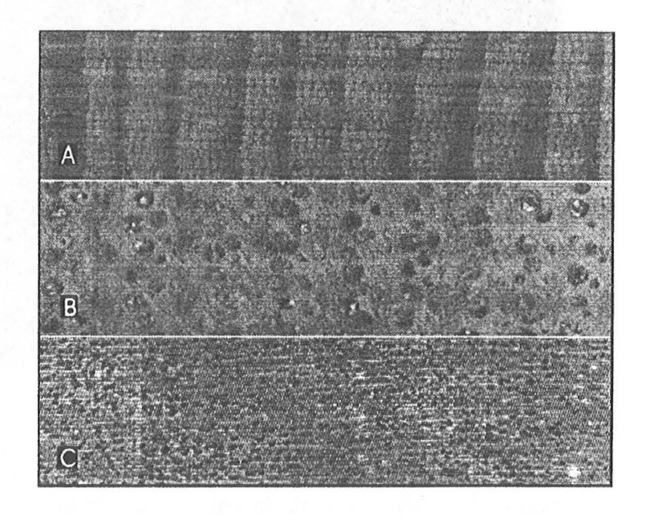


FIGURA 12: En la Alambra de los siglos XIV-XV se utilizaron principalmente tres maderas muy diferentes entre sí: pino (A), roble (B), y álamo (C). En cada caso, la elección se adecuaba a la funcion estructural encomendada al elemento; si bien estaba muy condicionada por la relativa abundancia de estas maderas en la región.

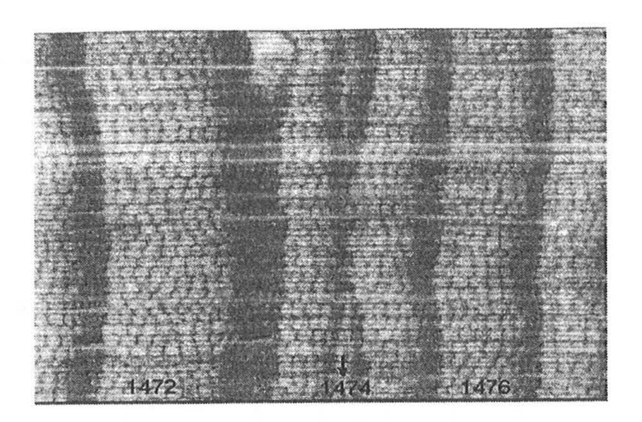


FIGURA 13: Anomalía de anillo parcialmente ausente en la madera de pino laricio procedente del palacio del Partal (La Alambra).

En arquitectura califal se ha estudiado los restos de la techumbre original de la Mezquita de Cordoba pertenecientes a las ampliaciones de al-Hakam II y Almanzor (961-987) .

Hay que resaltar que el objetivo central de estos estudios ha sido proporcionar una cronología segura y precisa que ha servido de base para fijar los criterios de restauración. No obstante, se han considerado también otros aspectos relevantes como la cronología relativa entre construcciones afines desde el punto de vista histórico y artístico. Así, por ejemplo, un estudio significativo de interdatación entre las torres mudejares de la iglesia de S. Pedro y de la Catedral de Teruel, ha revelado el orden en que se construyeron, resolviendo un debate entre especialistas que se basaba unicamente en criterios formales (figura 14).

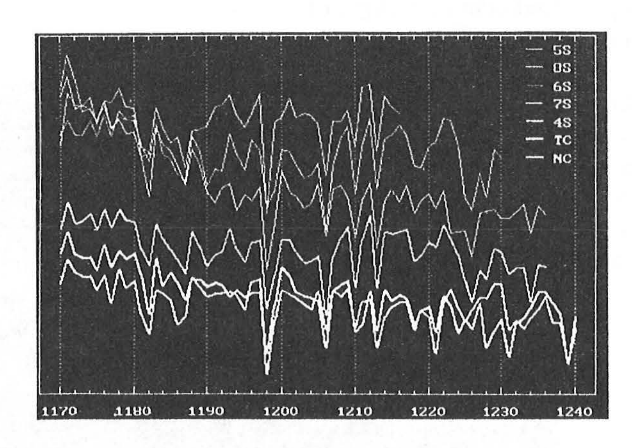


FIGURA 14: De arriba abajo, se presentan cinco curvas dendrocronológicas procedentes de la torre de San pedro (5S a $S) y dos de la catedral de Teruel (TC: torre / NC: Nave). Se observa un desfase de 16 años entre la curva de S. Pedro ($S), que finaliza en 1236, y la curva de la torre de la catedral de Teruel (TC), que lo hace en 1250. Con posteriorudad, se construye la techumbre de la catedral (NC) en 1261.

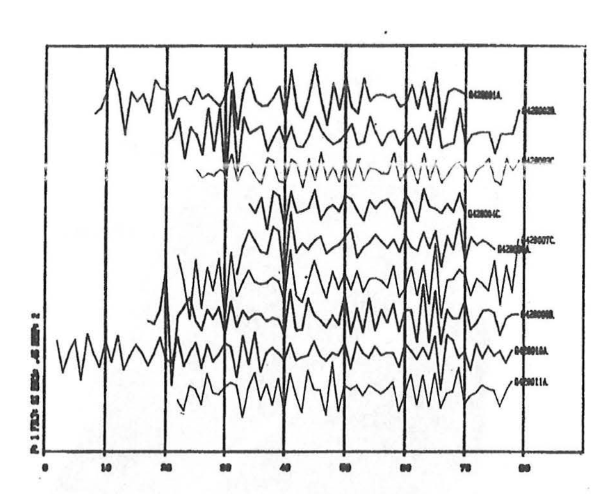


FIGURA 15: Sincronización del conjunto de curvas dendrocronológicas de las agujas de roble utilizadas en la construcción de la iglesia mozárabe de S. Baudelio de Berlanga (Soria) datada entre 1054 y 1076.

La aplicación de los métodos de dendrodatación ha sido posible en otros tipos de cons-trucciones, como las murallas de Albarracín (1251) o las Puertas y Murallas de Toledo, así como en obras de arte con soporte de madera como el retablo gótico de Olano, en Álava, enteramente construido a partir de un gran roble.

Actualmente, el Laboratorio de Dendrodatación desarrolla una investigación de la madera de edificios altomedievales de la Península Ibérica, trabajando en colaboración con el Laboratorio de Geocronología (carbono-14) y el Centro de Estudios Históricos (arqueología) del CSIC. Este equipo multidisciplinar ha estudiado la madera constructiva de las iglesias de S. Baudelio de Berlanga (1054-1076 DC; figura 15), S. Miguel de Gormaz (Soria; 810-926 DC) y S. Pedro de la Nave (Zamora; 330-474 DC). El objetivo prioritario es proseguir este estudio en otros edificios románicos y prerrománicos de nuestro país.

1.5. Datación carbono-14 y dendrocronología.

La determinación del contenido de carbono-14 en maderas datadas con la dendrocronología (bristlecone-pine en USA, y roble en Europa), ha mostrado que existen apreciables diferencias entre los valores de la radiodatación (años C-14) y los dendrocronológicos (años solares). Se observan dos tipos importantes de divergencias:

1. Una discrepancia a largo plazo producida por una oscilación con un periodo aprox. de 10.000 años que origina, por ejemplo, que una radiodatación de 6.000 años tenga, en realidad, aproximadamente mil años más.

2. Fluctuaciones de corto periodo (wiggless) que se sobreponen a la anterior y dificultan bastante la corrección de la radiodatación. Se ha demostrado el carácter universal de estas oscilaciones menores por la coincidencia de valores encontrada entre el roble europeo y el pino americano.

En la figura 12, la línea sinuosa de la izquierda representa la discrepancia del carbono-14 según Suess de la Universidad de California. Para una gran parte del periodo comprendido entre 5.000 y 10.000 años AC, los resultados del carbono-14 dan fechas más recientes que los anillos de madera. En la derecha de la figura se señalan algunas cronologías flotantes del roble europeo.

Sin embargo, la doble datación por carbono-14 y dendrocronología ha permitido la construcción de las curvas de calibrado en las que se relacionan ambos resultados. De este modo, se puede realizar una corrección sistemática de todas las radiodataciones incluidas dentro del período cubierto por las curvas de calibración.

Una exposición más detallada de esta técnica será el objetivo del siguiente apartado.

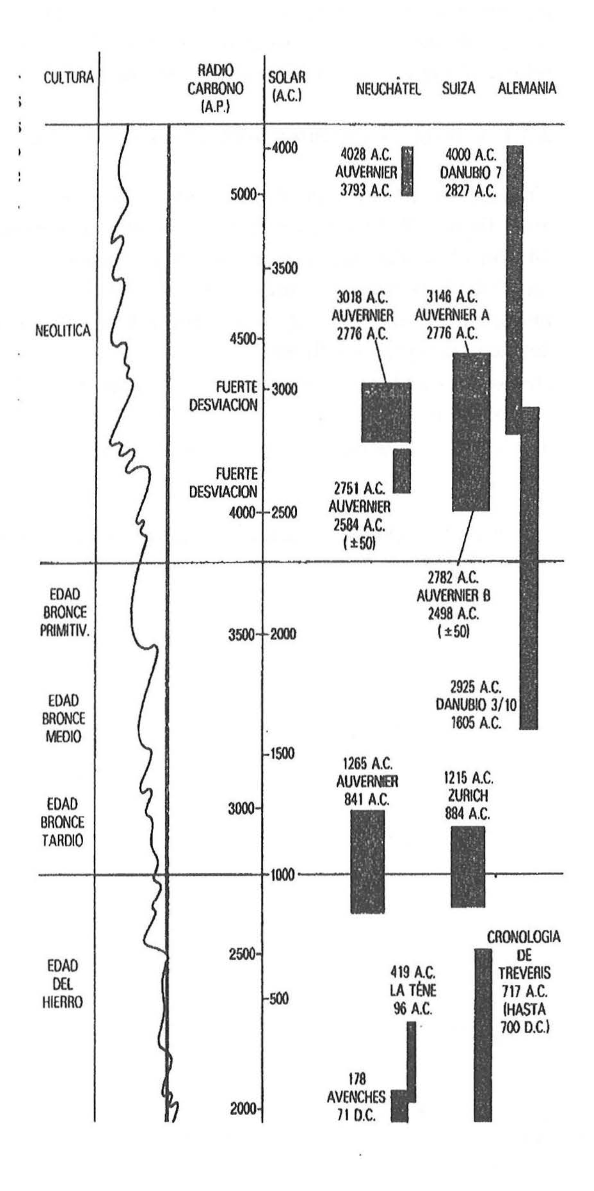


FIGURA 16: Diagrama comparativo entre carbono-14 (años14C) y dendrodatación (años solares).

II. LA DATACION DEL RADIOCARBONO

2.1 Introducción.

Se inicia su aplicación a partir de 1950 cuando Libby desarrolla la idea de medir la radiactividad remanente en cualquier resto biológico como un medio para estimar el tiempo transcurrido desde su formación. Por sus caracteristicas, esta radiactividad no se ve apenas afectada por la actividad fisico-química o biológica locales y depende basicamente de las grandes variaciones de los rayos cósmicos. En consecuencia, los resultados de la datación carbono-14 tienen una validez a escala universal.

Es aplicable a cualquier muestra de planta o animal que contenga pequeñas cantidades de carbono puro pero, en contrapartida, precisa de medios técnicos sofisticados tales como un equipo preciso para la medida de la radiactividad y refinadas técnicas de tratamiento químico y alto vacio.

En una primera etapa, los equipos utilizados medían la radiactividad solo a través de la actividad o nivel actual de desintegración del carbono-14. Progresivamente, se mejoran las técnicas de preparación del material al transformar el carbono sólido, bien en un gas (C02, acetileno o metano): método PGC, bien en un líquido (benceno): método LSC. A partir de 1977, se introduce la nueva técnica de la espectometría de aceleración de masas (método AMS), que mide directamente la concentración del isótopo carbono-14 -en lugar de la actividad- mediante el bombardeo de una muestra de grafito. Las ventajas de esta innovación son importantes: requiere menos material -mgrs. en lugar de grs- y el tiempo de conteo se reduce a sólo 15 -120 m., frente a las 48 horas habituales en la técnica tradicional.

2.2 Principios generales.

El carbono posee 2 isótopos estables: C-12 y C-13, y otro radiactivo: C-14. Al interaccionar los rayos cósmicos con los átomos de nitrogeno de la atmosfera se origina C-14:

$$7\,N14 + n \rightarrow 6C14 + p+$$

En torno al 60% del C-14 es generado en la estratosfera y su máxima concentración se registra a 12 Km de altitud en las latitudes polares. Al penetrar en la troposfera lo hace sobre todo en las latitudes medias y se difunde rapidamente por toda la superficie terrestre, como lo demuestra la concentración similar observada en anillos de árboles coetáneos situados en diferentes latitudes. El proceso inverso o desintegración del C-14 es un proceso lento con un periodo de semidesintegración: $T1/2 = 5730 \pm 40$ años que viene a restituir el N inicial:

$$6C14 \rightarrow 7N14 + \beta- \;(\, n \text{ --- } p+ + e- \,)$$

De este modo, se llega a una concentración de equilibrio del carbono-14 en la atmósfera, que actualmente es del orden del 1 por 1012 respecto al carbono-12. Como la incorporación del radioisótopo a las plantas y animales es continua mientras tienen actividad vital, la concentración de carbono-14 en cada ser vivo es similar a la atmosférica (principio de simultaneidad) y unicamente al cesar la vida el flujo se interrumpe y la concentración del carbono-14 comenzará a disminuir por desintegración.

La edad de una muestra podrá ser así calculada a partir de la actividad del radioisótopo (nº de desintegraciones por gramo de carbono y unidad de tiempo) mediante la expresión:

$$T = -8033 \ln A14 / A140$$

siendo: A14 : actividad medida A140: actividad original.

Esta ecuación básica muestra que la edad depende de la razón 14A/14Ao , es decir, del valor relativo de 14ª. Conforme a esto, un error relativo de sólo 1 % tendra un efecto de aprox. 80 años en la edad. Asimismo, se deduce que existirá en la práctica una edad límite de datación cuando A14 llega a ser menor que la radiactividad de fondo, debida al propio equipo y a la radiación cósmica no filtrada. Este límite de orden técnico se situa actualmente en torno a los 45.000 años. Por convención, todas las radiodataciones son expresadas como "antes del presente" (AP) tomando como referencia el año 1950. Asimismo se sigue utilizando en los cálculos el valor de la primera medición de $T1/2= 5.568$ años (con un error de + 3%), con el fin de evitar la confusión que se originaría al mezclar dataciones antiguas y recientes.

Inevitablemente, la medición está sometida siempre a un error experimental (desviación típica, σ) que, conforme al modelo teórico (Poisson) tiene un error relativo igual a $1/\sqrt{14A}$. Así, con la reducción de 14A debida a una mayor edad de la muestra, inevitablemente, el error relativo será también mayor. No obstante, este error puede ser aminorado, en buena medida, actuando sobre los factores que implican un incremento de 14A: la cantidad de muestra y el tiempo de medición. Así, por ejemplo, una muestra con un contenido de 1 gr. de C podrá dar un error de ± 60 años para una edad de 5.000 AP.; pero si tenemos 25 gr. el error bajaría a ±12 años. Estas mejoras son sólo factibles en la técnica convencional, puesto que en la nueva técnica AMS, el error dependerá sobre todo de la estabilidad del acelerador.

2.3 La aplicación del método.

La práctica de la datación carbono-14 presenta diferentes problemas y margenes de incertidumbre, que pueden ser inherentes a los fundamentos del método o pueden tener un carácter incidental, como es el caso de la contaminación de las muestras y todos los aspectos relativos a la interpretación de los resultados.

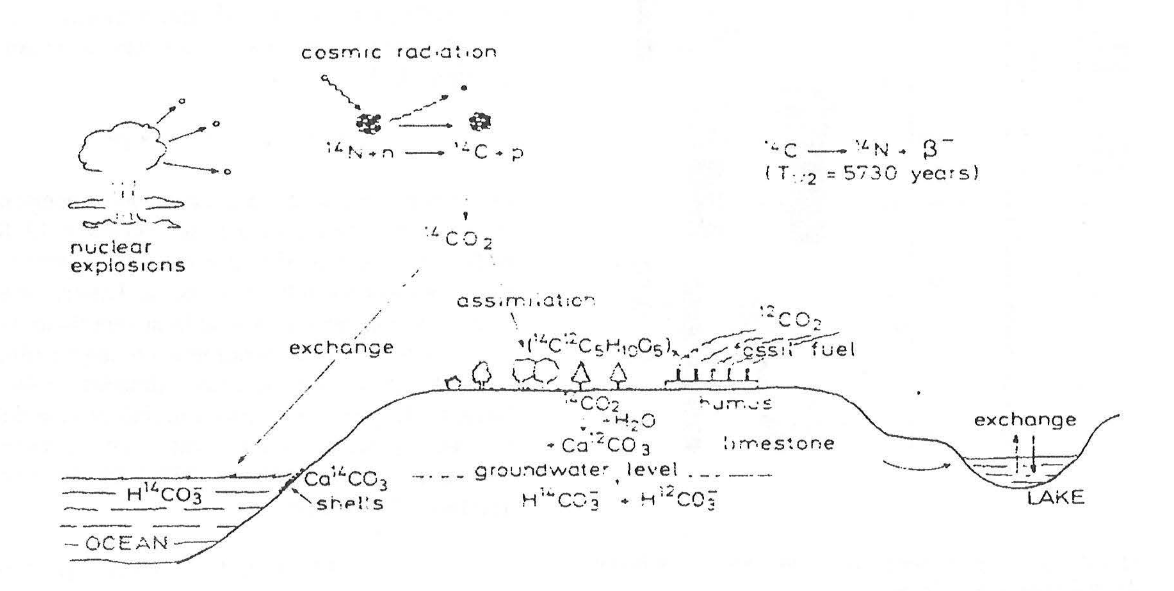
2.3.1 Condicionamientos inherentes al método.

Un esquema del flujo del carbono en la Tierra se recoge en la figura 17. Los principales reservorios de carbono-14 son el fondo oceánico y, en menor proporción, la biosfera, hidrosfera y atmósfera. Si bien las vias de intercambio del 14CO2 son variadas y complejas, destacan dos grandes flujos:

atmósfera → plantas → animales → agua del suelo (disolución).

atmósfera ↔ océanos / lagos (disolución).

FIGURA 17 (ABAJO): Circulación del carbono en la naturaleza (tomado de Mook & Waterbolk. 198).



Lejos de ser estables, los grandes cambios climáticos están redimensionando continuamente los principales reservorios, como ha sucedido en el océano al disminuir su temperatura media en la última glaciación, lo que provocó un fuerte incremento del C02 disuelto, mientras que en la atmósfera la concentración descendía hasta el 60% del nivel actual.

No obstante, las grandes variaciones de carácter geofísico son las responsables de las más notables oscilaciones de C-14 a lo largo de tiempo. En efecto, la producción de C-14 atmosférico depende del grado de penetración de la radiación cósmica, que a su vez está limitada por la propia intensidad del campo magnético de la Tierra y que actua, en todo momento, como un "gran escudo" frente a la radiación exterior.
A partir de la medida del carbono-14 presente en los anillos de crecimiento del pino aristata y del roble europeo que forman series bien datadas con más de 7.000 años, se ha podido detectar y precisar las oscilaciones del carbono-14, cuyas principales características son las siguientes:

1. *Una tendencia de largo periodo* de casi 9.000 años producida por la variación del campo magnético terrestre, en la que la tasa de C-14 ha ido en aumento hacia el pasado (figura 18).

2. *Variaciones de período medio*, provocadas por cambios en la actividad solar que modifican el magnetismo terrestre. Son los conocidos "efecto De Vríes" y "Suess W¡ggles", que consisten en variaciones de la edad aparente del orden de medio siglo en tiempos históricos.

3. *Fluctuaciones de corto periodo*, ligadas a los ciclos solares de aproximadamente 11 años.

4. *La combustión de carbón fósil*, que ha provocado un notable incremento del C02 pobre en C-14 a lo largo de la era industrial.

5. *Las pruebas nucleares*, realizadas a mediados de este siglo, que han tenido un efecto contrario al incrementar algo el C-14 atmosférico.

Una consecuencia de lo expuesto es la necesidad de aplicar una corrección a las fechas obtenidas en la radiodatación. Esta operación que se denomina calibrado se realiza mediante las curvas de calibración obtenidas con la datación de los anillos de árbol, y proporcionan la edad corregida con un margen de error variable en función de la pendiente que tenga la curva en cada edad. El caso más desfavorable se produce cuando la curva presenta fuertes oscilaciones llegando a obtenerse intervalos disjuntos para una misma radiodatación (figura 19).

Existen, finalmente, otros factores que afectan también al resultado y que están producidos por diferentes gradientes y desequilibrios que surgen en el flujo del carbono. Los más importantes son:

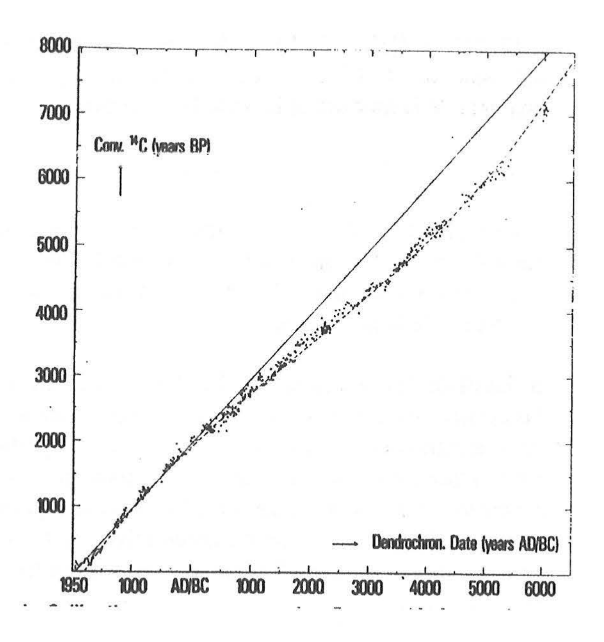


FIGURA 18: Divergencia de largo periodo observada entre radiodatación (ordenadas) y dendrodatación (absisas). Tomado de Mook & Waterbolk (1985).

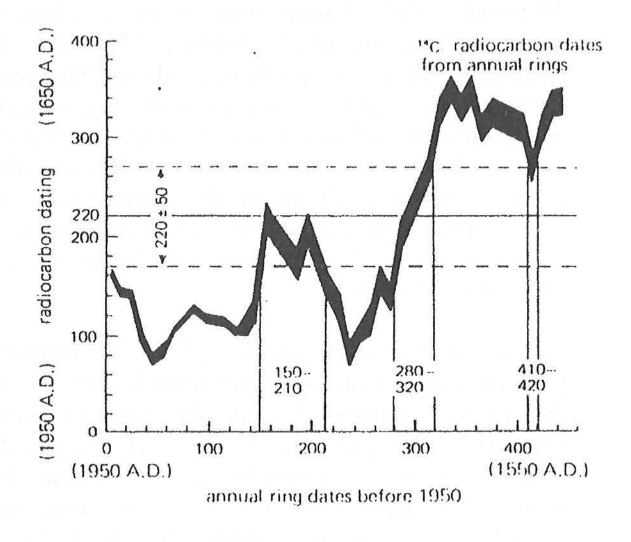


FIGURA 19: Una radiodatación (ordenadas) puede tener varias dataciones corregidas (abscisas). Tomado de Schweingruber (1982).

I. En cada fase de intercambio que experimenta el carbono (fotosíntesis, precipitación de carbonatos, etc.), se produce el fenómeno *del fraccionamiento isotópico*, que consiste en una disminución del C-14 en relación con el isótopo estable C-12. Afortunadamente, este fenómeno afecta igualmente al C-13 (que es estable, es decir, sin desintegración), por lo que la relación

&13 "C = f(13C 1 12C _l) permite corregir la actividad del C-14 o, lo que es lo mismo, la edad aparente de la muestra aplicando la expresión:

AT = (8 13C +25). 16 (años)

Como el valor de esta desviación puede ser muy variable en función del material analizado (-400, +400), se ha convenio incorporar siempre esta corrección a los resultados de la radiodatación.

II. La dinámica de difusión del C-14 hacia el fondo de los océanos es muy lenta y provoca una disminución de su concentración en un 15% respecto a la to superficie. Este fenómeno es la causa del llamado *efecto reservorio* que afecta a las conchas marinas pues el ascenso del agua del fondo oceánico rebaja su C-14 en un 5% y esto equivale a falsear su edad real en torno a +400 años.

III. Asimismo se ha observado que el contenido de C-14 en la atmósfera es algo menor en el hemisferio sur, lo que se atribuye a la mayor superficie de intercambio de C02 entre atmósfera y océano en este hemisferio. En consecuencia, las muestras de madera del hemisferio sur resultan 30 años más viejas que las muestras coetáneas del hemisferio norte.

2.3.2 Condicionamientos incidentales.

La contaminación de una muestra con restos de diferente(s) edad(es) tiene como efecto la rebaja o incremento de su edad aparente. El efecto es particularmente nocivo en muestras de bastante edad (20.000 años) cuando la contaminación es producida por restos muy recientes. Por este motivo, es preciso controlar las posibles causas de contaminación, tales como la presencia de raices de plantas vivas, las filtraciones de agua cargadas de sustancias húmicas, o la propia actividad metabólica mezcladora de los organismos del suelo.

El tratamiento químico que se aplica a las muestras para concentrar su carbono, sirve también para realizar dataciones separadas de las distintas fracciones obtenidas. Así, por ejemplo, en el tratamiento denominado "A" se separa la fracción alcalina con HCI, y en el tratamiento "AAA" se separa además una segunda fracción mediante NaOH. De este modo, la prueba de contaminación típica aplicada sobre muestras muy antiguas consistirá en realizar la datación separada de la fracción alcalina para comprobar si su edad es o no es igual al resto.

Sin embargo, la necesidad de realizar un tratamiento químico que concentre el carbono y elimine la contaminación obliga a incrementar bastante el tamaño de la muestra. De este modo, la cantidad precisa de material es muy variable: para obtener 1 gr de C, bastan 2-4 grs. de madera carbonizada (70% C), pero se precisan al menos 50 grs de hueso, dado su bajo contenido en carbono orgánico («5%C).

2.4 El resultado de la radiodatación.

En una radiodatación se observan varios intervalos de error:

a) el error empírico de la propia medida de la actividad del carbono-14: o (date).

b) El intervalo corregido obtenido del anterior mediante una curva de calibración.

c) El error de la propia curva de calibración: o (curve).

La formulación de la radiodatación suele adoptar una notación convencional como, por ejemplo:

T conv. = 1.400 + 40 BP (GrN-x) 600-660 Cal.AD*

Lectura: Se indica la edad aparente afectada del error empírico para 1 a (coeficiente de confianza, 68%) -la edad BP se contabiliza a partir de 1950-, seguida del código del laboratorio entre paréntesis. Se añade la edad calibrada (Cal. AD), con una indicación de la referencia (*) de donde se ha tomado la curva de calibración aplicada.

2.5. Un método combinado de datación.

Algunas relaciones metodológicas entre las dos técnicas de datación ya han sido evidenciadas. La calibración del carbono-14 solo ha sido posible gracias a la existencia previa de largas cronologías absolutas para la madera. Y a la inversa, bastantes estudios de dendrodatación, en los que sólo se han obtenido cronologías flotantes, se han apoyado en la datación carbono-14 para lograr la datación.

Existen, no obstante, otras posibilidades de aplicar combinadamente ambas técnicas a la madera, de manera que puedan mejorarse los resultados que se obtendrían al aplicar independientemente cada uno de los dos métodos.

Mencionaremos aquí sólo algunas de estas opciones, que forman parte de una investigación actualmente en curso aplicada a bienes culturales de nuestro país. En primer lugar, el estudio dendrocronológico del material nos permite el conocimiento de la secuencia de anillos, la interdatación entre fragmentos y, finalmente, la obtención de una muestra de tamaño lo más grande posible. De este modo, podemos lograr muestras que minimicen el error experimental.Asi, por ejemplo, si logramos incrementar cuatro veces el tamaño de la muestra, el error se reducirá a la mitad. Asimismo la selección de un intervalo de anillos adecuado dentro de la secuencia total disponible permite, elegir la zona más favorable de la curva de calibración.
En consecuencia, el resultado de la datación carbono-14 será mejor, con un reducido intervalo de error en su edad, lo que va a significar el incremento de las posibilidades de un futuro ensayo de dendrodatación (figura 20)

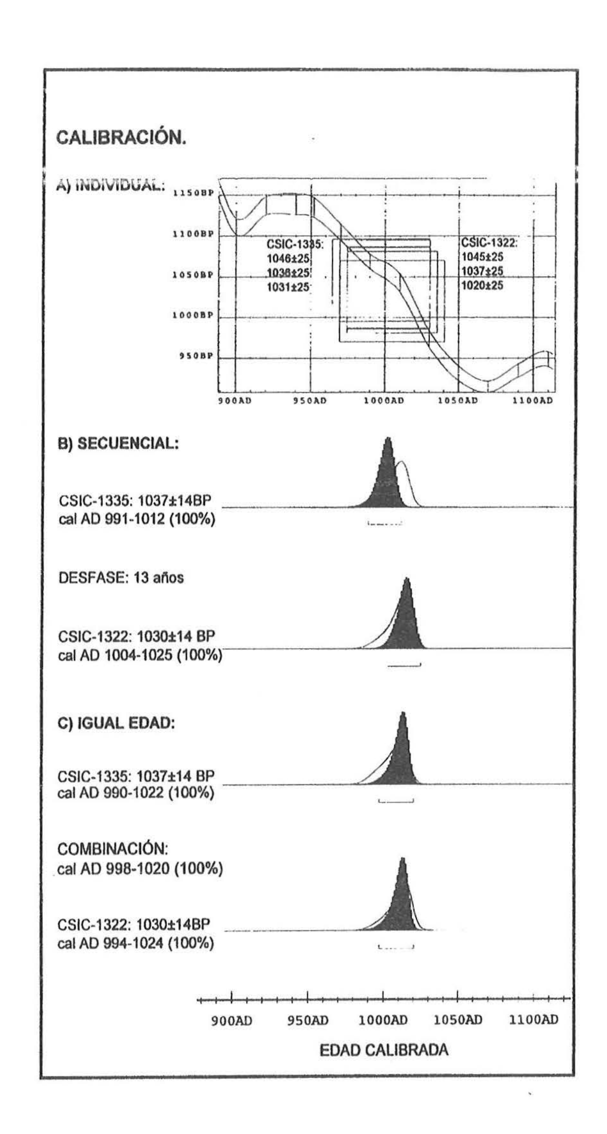


FIGURA 20: Datación carbono-14 de una aguja de roble en S. Baudelio de Berlanga. Se presentan de arriba abajo tres opciones de caklibración: individual, secuencial y de igual edad para una muestra seleccionada. De este modo, se ha logrado una excelente precisión en el resultado: 1054-1076 cal AD (100%).

La táctica metodológica descrita adquiere una especial relevancia cuando el material disponible sea escaso y con elevada edad. Este perfil de circunstancias es típico de los restos de madera de los edificios altomedievales de nuestro país, para los que, en consecuencia, es muy difícil elaborar cronologías absolutas de referencia que, tal como hemos indicado, son imprescindible para la datación dendrocronológica. Por ello, el procedimiento esbozado constituye una buena alternativa para la construcción de estas referencias, al tiempo que puede representar un avance en la investigación cronológica del patrimonio altomedieval Español.

REFERENCIAS BASICAS.

AITKEN, M.J. 1990: *Science-based dating ín archaelogy* Longman. London. 273 pp.

BAILLIE, M.G.L. 1995: *A slice through time. Dendrochronology andprecision dating*, Batsford, London. 176 pp.

BOWMAN, S. (1990): Radiocarbon Dating. Interpreting the past. British Museum.Londres. 64 pp.

ECKSTEIN,D. BAILLIE,M.G.L.,EGGER,H. 1984: Handbook for arqueologists. Nª2: Dendrochronological dating. European Science Foundation, Strasbourg, 55 pp.

FRITTS,H.C. 1976: Tree-ring and climate. Academic Press.Londres. 567 pp.

MOOK,W.G. y WATERBOLK,H.T.1985: Handbook for arqueologists. NO 3: Radiocarbon Dating European Science Foundation, Strasbourg, 65 pp.

RODRIGUEZ TROBAJO, E. y RICHTER, K. 1985: Datación de edificios históricos mediante la dendrocronologia. En: La madera en la conservación y restauración del Patrimonio Cultural. Ministerio de Cultura. pp. 101-110.

RODRíGUEZ TROBAJO, E. 1999: Dendrocronometría de maderas altomedievales en la Península Ibérica: S. Baudelio de Berianga (Soria). *111 Congreso de Arqueología Peninsular.*

NOTAS

CUADERNO



CATÁLOGO Y PEDIDOS EN

http://www.aq.upm.es/of/jherrera

jherrera@aq.upm.es

